

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra energetiky

Bakalářská práce

Přepracování a úprava radioaktivních odpadů

Reprocessing and Treatment of Nuclear Waste

Student: Zdeněk Šmída

Vedoucí bakalářské práce: Prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.

Ostrava 2012

## Zadání bakalářské práce

Student:

**Zdeněk Šmída**

Studijní program:

B2341 Strojírenství

Studijní obor:

3907R009 Provoz energetických zařízení

Téma:

**Přepracování a úprava radioaktivních odpadů**  
**Reprocessing and Treatment of Nuclear Waste**

Zásady pro vypracování:

Zpracujte a předložte formou rešerše literatury souhrn informací o technologiích přepracování a úpravy pevných a kapalných radioaktivních odpadů, kde provozovatelé jaderných elektráren jsou nuceni řešit zejména otázky zacházení s pevným a kapalným nízkoaktivním odpadem a realizovat zpracovatelské technologie.

Zpracujte zejména poznatky o systému zpracování, tvorbě pevných a kapalných RAO.

Závěry aplikujte na podmínky provozu jaderných elektráren v ČR a možnosti likvidace pevných a kapalných radioaktivních odpadů.

Grafická část bude obsahovat:

1. Schémata zařízení na úpravu a přepracování RAO.
2. Grafické výstupy vybraných měření.

Seznam doporučené odborné literatury:

HEJZLAR, Radko. *Stroje a zařízení jaderných elektráren*. Díl 1 a 2. Vydavatelství ČVUT v Praze, 2005. 385 s. ISBN 80-01-03189-6.

MÁTAL, Oldřich. *Jaderné reaktory a jejich chlazení*. Nakladatelství CERN VUT v Brně. 2001. 116 s. ISBN 80-214-2028-6.


HEZOUČKÝ, František. *Základy teorie provozních režimů jaderných elektráren s tlakovodními reaktory*. Vydavatelství ČVUT v Praze, 2005. 185 s. ISBN 80-01-03324-4.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

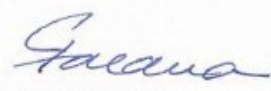
Vedoucí bakalářské práce: **prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.**

Datum zadání: 16.12.2011

Datum odevzdání: 21.05.2012

  
prof. Ing. Dagmar Juchelková, Ph.D.  
vedoucí katedry



  
prof. Ing. Radim Farana, CSc.  
děkan fakulty

### Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 21. 5. 2012



.....

podpis studenta

## Prohlášení o využití výsledků práce

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 21. 5. 2012

.....  
podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Zdeněk Šmída

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Břeclav, Křivá 24, 690 06

## **ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

ŠMÍDA, Z. *Přepřacování a úprava radioaktivního odpadu: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky, 2012, 60 s. Vedoucí práce: Prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.

Bakalářská práce se zabývá otázkami spojenými s radioaktivním odpadem. V úvodu je prezentován souhrn informací o původu radioaktivního odpadu a jeho rozdělení do příslušných kategorií. Další kapitoly se věnují technologiím přepřacování, úpravy, solidifikace a konečné likvidaci uložením především pevných a kapalných radioaktivních odpadů. Poslední kapitola teoretické části popisuje strategii nakládání s radioaktivním odpadem v České republice. Praktická část se věnuje měření a hodnocení obsahu přírodních radionuklidů ve stavebním materiálu a odpadu. V úvodu je rozebrána zákonná legislativa, metodika měření a obecný výpočet potřebných parametrů. Dále jsou načrtnuty postupy používané při překročení směrné nebo mezní hodnoty obsahu přírodních radionuklidů. Tyto výstupy jsou na závěr aplikovány na modelový příklad.

### **KLÍČOVÁ SLOVA**

Radioaktivní odpad, radioaktivita, úložiště, radionuklid, scintilační spektrometrie, polovodičová spektrometrie, index hmotnostní aktivity, hmotnostní aktivita

## **ANNOTATION OF BACHELOR THESIS**

ŠMÍDA, Z. *Reprocessing and Treatment of Nuclear Waste: Bachelor Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Energy, 2012, 60 p. Supervisor: Prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.

The thesis deals with issues related to radioactive waste. The introduction presents summary of information about the origin of radioactive waste and its categorization. The following chapters are devoted to description of reprocessing technologies, treatment, solidification and final disposal of primarily solid and liquid radioactive waste. The last chapter of the theoretical part describes the strategy of radioactive waste treatment in the Czech Republic. The practical part deals with the measurement and assessment of the natural radionuclides quantity in building materials and waste. The analysis of statutory legislation, measurement methodology and general procedure for calculation of required parameters is included in the introduction. Furthermore, the procedures, applied in the case of exceeding natural radionuclides limits, are briefly described. These outputs are finally applied to the model example.

### **KEYWORDS**

Radioactive waste, radioactivity, storage, radionuclide, scintillation spectrometry, semiconductor spectroscopy, mass activity index, mass activity

## Obsah

Seznam symbolů, veličin a zkratk	11
Značení veličin a jednotky	11
Zkratky	12
1. Úvod	13
2. Odpad	14
2.1 Vznik RAO	14
2.2 Institucionální RAO	15
2.3 RAO z jaderných elektráren	15
2.3.1 Použité jaderné palivo	15
2.3.2 Další RAO z jaderných elektráren	16
2.4 Dělení a kategorizace RAO	16
2.4.1 Rozdělení RAO dle skupenství	17
2.4.2 Rozdělení RAO dle aktivity	17
2.4.3 Rozdělení RAO podle spalitelnosti	18
2.4.4 Rozdělení podle obsahu alfa aktivity	18
2.4.5 Kategorizace nízko a středně aktivního RAO	18
3. Systém zpracování RAO	19
3.1 Minimalizace množství vznikajících RAO	19
3.2 Třídění a oddělování RAO	19
3.3 Balení RAO	20
3.4 Lisování	20
3.4.1 Nízkotlaké lisování	20
3.4.2 Vysokotlaké lisování	21
3.4.3 Zásady pro konstrukci lisu	21
3.5 Spalování	21
3.5.1 Faktory efektivního spalování	22
3.5.2 Kinetické procesy spalování	22
3.5.3 Požadavky na spalovací proces	23
3.5.4 Příklady metod spalování	23
4. Úprava RAO před uložením	25
4.1 Bitumenace	25
4.2 Cementace	25
4.3 Fixační matrice SIAL	26

## Obsah

4.4	Polymerace.....	26
4.5	Vitifikace .....	26
5.	Ukládání .....	27
5.1	Uložení nízkoaktivních a středně aktivních RAO .....	27
5.2	Uložení vysoce aktivních RAO .....	27
5.3	Hlubinné úložiště jaderného odpadu.....	28
5.3.1	Bezpečnostní bariéry hlubinného úložiště jaderného odpadu .....	28
5.4	Perspektiva: ukládání do síry .....	29
6.	Strategie nakládání RAO v ČR .....	30
6.1	Minulost, současnost a budoucnost ukládání PJP v ČR .....	30
6.2	Hlubinné úložiště v ČR.....	31
6.2.1	Úložiště RAO Richard.....	31
6.2.2	Úložiště Bratrství.....	31
6.2.3	Úložiště Hostim .....	31
6.3	Ukládání v Dukovanech.....	32
6.4	Ukládání v Temelíně.....	32
7.	Měření a hodnocení obsahu přírodních radionuklidů ve stavebních materiálech a odpadech .....	33
7.1	Úvod praktické části .....	33
7.2	Rozbor legislativy .....	33
7.2.1	Atomový zákon .....	33
7.2.2	Prováděcí předpisy SÚJB .....	34
7.3	Odběr a úprava vzorků.....	36
7.4	Měření vzorků.....	36
7.4.1	Měřicí a výpočetní metody spektrometrie gama .....	36
7.4.2	Zpracování výsledků .....	42
7.4.3	Výpočet indexu.....	43
7.4.4	Vyjadřování a hodnocení výsledků .....	44
7.5	Postup při překročení mezní a směrné hodnoty .....	45
7.5.1	Překročení mezní hodnoty .....	45
7.5.2	Překročení směrné hodnoty .....	45
7.6	Optimalizační postupy .....	46
7.6.1	Hodnota přínosu opatření .....	47
7.6.2	Koeficient emanace radonu .....	47
8.	Modelový příklad .....	48

## Obsah

8.1	Úvod příkladu .....	48
8.2	Zadání .....	48
8.3	Výpočet základních parametrů .....	49
8.3.1	Výpočet dle scintilační spektroskopie gama .....	49
8.3.2	Zpracování výsledků .....	49
8.3.3	Výpočet indexu.....	51
8.4	Výpočet dávky zevního ozáření.....	52
8.5	Optimalizační postupy .....	52
8.5.1	Složka zodpovědná za zvýšený obsah přírodních radionuklidů.....	53
8.5.2	Určení koeficientu emanace radonu .....	53
8.5.3	Uvažovaná opatření .....	53
8.5.4	Obsah přírodních radionuklidů v betonu po provedení opatření .....	54
8.5.5	Odhad přínosu uvažovaného opatření .....	54
8.6	Hodnocení výsledků měření .....	55
9.	Závěr .....	56
10.	Seznam použité literatury .....	58
11.	Seznam příloh.....	60
Přílohy		



## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 2-1: Rozdělení RAO dle místa původu a aktivity [3]</i>	14
<i>Obrázek 2-2: Rozdělení institucionálních RAO dle původu a jejich zpracování[4]</i>	15
<i>Obrázek 2-3: Přeměna v jaderném palivu po „vyhoření“ v reaktoru [4]</i>	16
<i>Obrázek 5-1: Bezpečnostní bariéry hlubinného úložiště [11]</i>	28
<i>Obrázek 6-1: První sklad PJP v areálu Jaderné elektrárny Dukovany, kontejner Castor [12]</i>	32
<i>Obrázek 7-1: Scintilační detektor [23]</i>	37
<i>Obrázek 7-2: Schéma scintilačního detektoru (horní větev) a spektrometru (dolní větev)</i>	37
<i>Obrázek 7-3: Schéma polovodičového fotodetektoru [20]</i>	39
<i>Obrázek 7-4: Polovodičový detektor HPGe [24]</i>	39
<i>Obrázek 8-1: Tvárnice z geopolymerního betonu [26]</i>	48

**SEZNAM TABULEK**

<i>Tabulka 2-1: Hlavní charakteristiky nízko a středně aktivního RAO [1]</i>	18
<i>Tabulka 6-1: Souhrn informací o úložištích RAO v ČR [12]</i>	30
<i>Tabulka 7-1: Mezní hodnoty obsahu přírodních radionuklidů ve stavebním materiálu [17]</i>	34
<i>Tabulka 7-2: Směrné hodnoty obsahu přírodních radionuklidů ve stavebním materiálu [16]</i>	35
<i>Tabulka 7-3: Rozsah rozborů obsahu přírodních radionuklidů ve stavebním materiálu [17]</i>	35
<i>Tabulka 7-4: Emise vybraných radionuklidů [19]</i>	36
<i>Tabulka 7-5: Mezní hodnoty detekce hmotnostní aktivity a nejistoty měření [17]</i>	42
<i>Tabulka 7-6: Rozdělení materiálů dle využití [17]</i>	46
<i>Tabulka 7-7: Průměrné koeficienty emanace radonu pro vybrané materiály a odpady [17]</i>	47
<i>Tabulka 8-1: Naměřené hmotnostní aktivity [Vlastní zpracování]</i>	48
<i>Tabulka 8-2: Podklady pro odhad relativní standardní nejistoty - scintilační spektrometrie [17]</i>	49
<i>Tabulka 8-3: Naměřené hmotnostní aktivity upřesněné o chybu měření [Vlastní zpracování]</i>	50
<i>Tabulka 8-4: Naměřené hmotnostní aktivity v betonu upřesněné o chybu měření a index hmotnostní aktivity a rozšířenou nejistotu indexu hmotnostní aktivity [Vlastní zpracování]</i>	52
<i>Tabulka 8-5: Naměřené hmotnostní aktivity elektrárenského popela upřesněné o chybu měření a index hmotnostní aktivity a rozšířenou nejistotu indexu hmotnostní aktivity [Vlastní zpracování]</i>	53
<i>Tabulka 8-6: Naměřené hmotnostní aktivity elektrárenského popela z jiného zdroje, upřesněné o chybu měření a index hmotnostní aktivity a rozšířenou nejistotu indexu hmotnostní aktivity [Vlastní zpracování]</i>	53
<i>Tabulka 8-7: Naměřené hmotnostní aktivity v betonu po provedení opatření, upřesněné o chybu měření a index hmotnostní aktivity a rozšířenou nejistotu indexu hmotnostní aktivity [Vlastní zpracování]</i>	54

**Seznam symbolů, veličin a zkratk****Značení veličin a jednotky**

<b>Značka</b>	<b>Veličina</b>	<b>Jednotka</b>
$E$	Zevní dávka ozáření	Sv/rok
$E_{el}$	Elektrická energie	Ws
$F_a$	Opravný faktor samoabsorpce	1
$F_c$	Opravný faktor na skutečné koincidence	1
$F_i$	Koeficient zevní dávky ozáření	1
$H$	Jednotkový dávkový ekvivalent	Sv
$I$	Index hmotnostní aktivity	1
$I_{ND}$	Nejmenší detekovatelná hodnota indexu hmotnostní aktivity	1
$N_A$	Celkový počet impulzů v kanálech, ze kterých je stanovena plocha píku	1
$N_B$	Celkový počet impulzů v kanálech, ze kterých je stanovena základna pod píkem	1
$N_P$	Počet impulzů pozadí	1
$N_V$	Počet impulzů vzorku	1
$P$	Hodnota přínosu opatření	Kč/m <sup>3</sup>
$Pl$	Plocha píku	imp/s
$Pl_{ND}$	Nejmenší detekovatelná plocha píku	imp/s
$P_P$	Plocha píku na spektru pozadí	imp/s
$U$	Rozšířená nejistota	Bq/kg
$U_I$	Rozšířená nejistota indexu hmotnostní aktivity	%
$U_{Ir}$	Rozšířená relativní nejistota indexu hmotnostní aktivity	%
$U_r$	Relativní rozšířená nejistota	%
$V$	Objem	m <sup>3</sup>
$a$	Hmotnostní aktivita	Bq/kg
$a_{ND}$	Nejmenší detekovaná aktivita	Bq/kg
$c_k$	Kalibrační koeficient	1
$e$	Emitovaná energie	eV
$f_i$	Přínos ze snížení hmotnostní aktivity	1
$f_{Rn}$	Přínos ze snížení emise radonu	1
$k_A$	Počet kanálů v oblasti zájmu, ze kterých je stanovena plocha píku	1
$k_B$	Počet kanálů v oblasti zájmu, ze kterých je stanovena základna pod píkem	1

## Seznam symbolů a zkratk

<b>Značka</b>	<b>Veličina</b>	<b>Jednotka</b>
$k_{Rn}$	Koeficient emanace radonu	%
$m$	Hmotnost vzorku	Kg
$n$	Přebytek vzduchu	1
$p$	Tlak	Pa
$t$	Tloušťka	m
$u$	Relativní standardní nejistota (polovodičová spektrometrie)	%
$u_I$	Standardní nejistota indexu hmotnostní aktivity	1
$u_{Ir}$	Standardní relativní nejistota indexu hmotnostní aktivity	%
$u_k$	Standardní nejistota (scintilační spektrometrie)	Bq/kg
$u_P$	Standardní nejistota plochy píku ve spektru pozadí	imp/s
$u_{Pl}$	Standardní nejistota plochy píku	imp/s
$u_r$	Standardní nejistota (polovodičová spektrometrie)	Bq/kg
$u_{rk}$	Relativní standardní nejistota (scintilační spektrometrie)	%
$T$	Teplota	K
$t_p$	Doba měření pozadí	s
$t_v$	Doba měření vzorku	s
$\gamma$	Výtěžek fotonů gama na 100 přeměn radionuklidu	1
$\eta$	Fotopíková detekční účinnost	%
$\eta_{kk}$	Účinnost k-tého radionuklidu	%
$\rho$	Hustota	Kg/m <sup>3</sup>

## Zkratky

<b>Zkratka</b>	<b>Význam</b>
ČEZ	České energetické závody
HPGe	Vysoce čisté germanium
JE	Jaderná elektrárna
JP	Jaderné palivo
LLW	Odpady s nízkou úrovní radiace
PE	Polyethylen
PVC	Polyvinylchlorid
PJP	Použité jaderné palivo
RAO	Radioaktivní odpad(y)
SÚJB	Státní úřad pro jadernou bezpečnost
SURAO	Správa úložišť radioaktivních odpadů
TRU	Transuranové odpady
UVJ	Ústav jaderného výzkumu
VVER	Vodo – vodní energetický reaktor

## 1. Úvod

Úkolem mé bakalářské práce, je objasnit čtenáři, co je to vlastně radioaktivní odpad, odkud se bere, jak jej rozdělujeme a jak s ním bezpečně zacházet při jeho přepracování či likvidaci. Téma, které jsem si zvolil je velmi důležité, protože podíl využití jaderné energie ve světě stále stoupá a i u nás se počítá s dostavbou jaderné elektrárny Temelín. Tudiž pochopení problematiky bezpečného zpracování, především odpadů z jaderných elektráren, je velmi důležité nejen kvůli ochraně životního prostředí, ale i kvůli veřejnému mínění naší společnosti, které v mnoha případech rozhoduje o využití jaderné energetiky.

V první kapitole teoretické části se věnuji tomu, co to vlastně radioaktivní odpad je, jak vzniká, jak jej dělíme a do jakých kategorií spadá dle úrovně své aktivity.

Ve druhé kapitole poskytuji informace o systému zpracování radioaktivních odpadů. Vycházím z předpokladu, že odpad, který není vytvořen, nevyžaduje žádné finanční prostředky na likvidaci. Dotknul jsem se zde také způsobů třídění a balení radioaktivních odpadů. Především však poukazuji na lisování a spalování. To jsou hlavní metody pro přepracování radioaktivních odpadů.

Ve třetí kapitole teoretické části uvádím další důležitý faktor a to je solidifikace radioaktivního odpadu. Charakterizuji zde jednotlivé metody znehybnění radionuklidů v pevné a stabilní matici, ve které je již možné radioaktivní odpad finálně uložit v úložišti.

Ve čtvrté kapitole se věnuji již uvedenému ukládání radioaktivních odpadů. Popisuji zde rozdílné způsoby ukládání odpadů dle jejich radioaktivity. Největší důraz zde však kladu na popis hlubinného úložiště i jeho bezpečnostních bariér.

V poslední kapitole teoretické části uvádím, jakým způsobem nakládáme u nás v České republice s radioaktivním odpadem. Věnuji se hlavně popisu úložišť nízko a středně aktivních odpadů, plánům na výstavbu hlubinného úložiště a nakládání s radioaktivním odpadem v jaderných elektrárnách v Dukovanech a v Temelíně.

V praktické části své bakalářské práce řeším měření a hodnocení obsahu přírodních radionuklidů ve stavebních materiálech a odpadech. Rozebírám zde legislativu, výpočetní postupy ve spektrometrii gama, způsob zpracování výsledků, výpočet indexu hmotnostní aktivity, postupy při překročení směrné a mezní hodnoty a optimalizační postupy.

V poslední kapitole své praktické části aplikuji informace, které jsem získal v předchozí kapitole, na modelový příklad. Zde spojuji energetiku ve strojírenství a nukleární fyziku se stavebním průmyslem. Provedu zde výpočet obsahu radionuklidů v geopolymerním betonu, jehož zdrojem je elektrárenský popílek.

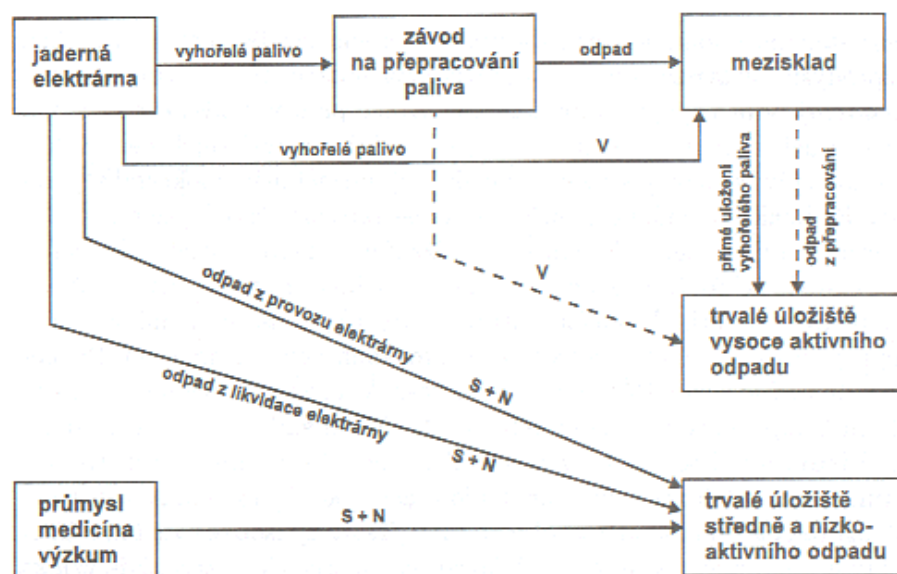
## 2. Odpad

Co je to vlastně odpad? Zákon říká, že odpad je movitá věc, které se člověk zbavuje nebo má úmysl nebo povinnost se jí zbavit. Vzniká snad při každé lidské činnosti a je silně spojen s naší civilizací. Lidé se jeho množství snaží snižovat a hledat efektivní metody jeho uložení či recyklace. [2]

### 2.1 Vznik RAO

Obecně mohou radioaktivní odpady (dále jen RAO) definovat tak, že jsou to všechny látky, které přišly do styku s radioaktivním prostředím. Tyto látky obsahují radioaktivní izotopy vzniklé při technologickém procesu např. během celého palivového cyklu, od vytěžení uranové rudy, až po likvidaci jaderné elektrárny (dále jen JE). To však není jediný druh vzniku RAO. Můžeme na ně např. narazit i při použití radionuklidů či ionizujícího záření v průmyslu, lékařství či vědecké činnosti.

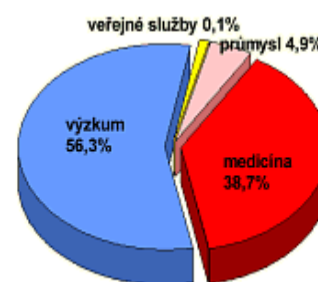
Nicméně použité jaderné palivo (dále jen PJP) představuje asi 1% všech RAO, ale obsahuje více než 90% veškeré radioaktivity. Proto nebezpečí, které RAO představují pro životní prostředí či lidské zdraví, není radno podceňovat. Je velmi důležité jejich bezpečné odstranění či přepracování. Tento požadavek současně i limituje rozvoj jaderné energetiky, jejíž vývoj musí jít ruku v ruce s jadernou bezpečností. Ta je legislativou přísně kontrolována. Avšak radioaktivita odpadu časem klesá. Než však i ty nejaktivnější RAO dosáhnou bezpečné úrovně záření, musí být uloženy tisíce i miliony let v úložištích za bezpečnostními bariérami. [1], [3]



Obrázek 2-1: Rozdělení RAO dle místa původu a aktivity a jejich zpracování[3]

## 2.2 Institucionální RAO

Jsou to jiné RAO než ty, které jsou získány „vyhořením“ jaderného paliva v JE. Vznikají při použití přírodních i uměle připravených radioizotopů či ionizujícího záření. Setkáme se s nimi v mnoha hospodářských odvětvích v průmyslu, lékařství a dalších oborech lidské činnosti. Jejich zdrojem jsou výzkumné laboratoře (nepřeberné možnosti užití), nemocnice (oddělení radiologie a nukleární medicíny), nejrůznější průmyslové či zemědělské závody atd. V Příloze B jsem uvedl graf vyprodukovaného množství těchto RAO. [4], [7]



Obrázek 2-2: Rozdělení institucionálních RAO dle původu [4]

## 2.3 RAO z jaderných elektráren

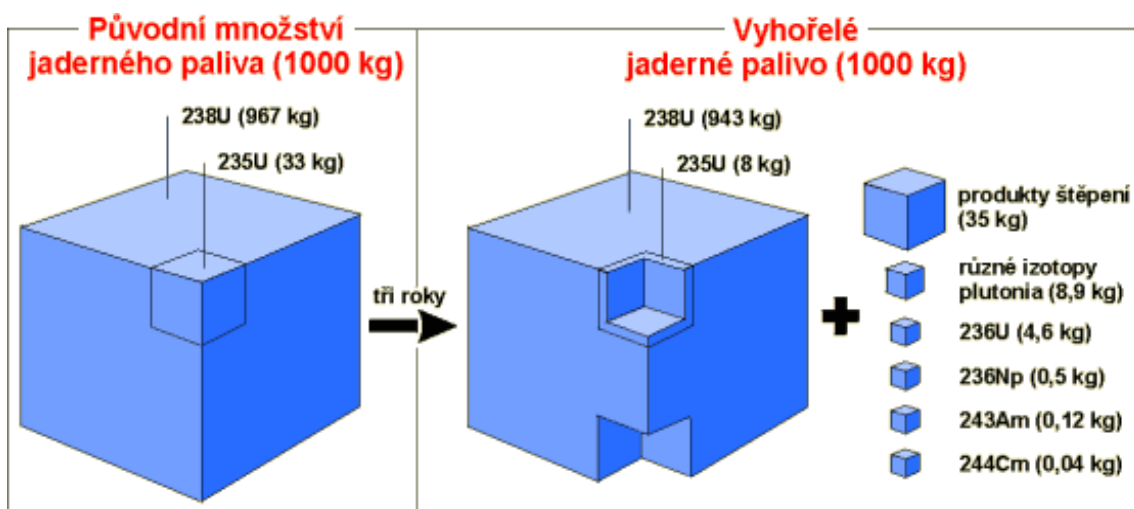
Při provozu každé JE vznikají dva druhy RAO. Jedním z nich je použité jaderné palivo a druhým je veškerý materiál či technické pomůcky, které přišly do styku s radioaktivním zářením. [5]

### 2.3.1 Použité jaderné palivo

PJP, které se dříve nazývalo vyhořelým, produkuje jaderný reaktor. Použitým jej nazývám proto, že již existuje technologie, jak PJP přepracovat, tak aby se dalo znovu využít jako palivo do reaktorů. V současné době se tato metoda již využívá v některých západních zemích. Nicméně prozatím je příliš drahá a není ekonomicky výhodné ji využívat. Avšak s rostoucí cenou uranu na světových trzích se v budoucnu jistě setkáme s masovějším využitím této technologie. Dále PJP obsahuje i radioizotopy, které by v budoucnu mohly být využity na získání vzácných prvků, např. platiny, paladia, stříbra atd.

Obecně mohu říci, že reaktor o výkonu 1000 MW vyprodukuje za rok asi 30 tun PJP. To představuje objem cca 1,5 m<sup>3</sup>. PJP se skládá z 95 % nespotřebovaného uranu <sup>238</sup>U, 1 % štěpitelného uranu <sup>235</sup>U, 1 % štěpitelného radioizotopu plutonia <sup>239</sup>Pu a ostatních produktů štěpné reakce. Nejradioaktivnějšími štěpnými produkty jsou cesium <sup>137</sup>Cs a stroncium <sup>90</sup>Sr s poločasem rozpadu kolem 30 let. Postupně dochází k rozpadu všech izotopů, ale některé mají poločas rozpadu tisíce i miliony let.

PJP, které je tedy vysoce radioaktivní, je nutné po vytažení zavážecím strojem z reaktoru skladovat. Použité palivo se do mezikladů ukládá na dobu 40 až 50 let. Skladování PJP se věnuje v kapitole 5.2. [5], [14]



Obrázek 2-3: Přeměna v jaderném palivu po „vyhoření“ v reaktoru [4]

### 2.3.2 Další RAO z jaderných elektráren

Další radioaktivní odpad z jaderných elektráren tvoří především dříve neaktivní součásti, materiály a vybavení ozářené reaktorem. Jsou to např.: [1]

- Ochranné prostředky (obleky, obuv, rukavice, ochranné štíty, zástěry atd.)
- Elektroinstalační materiál
- Části zařízení různých tvarů a rozměrů (kovové i nekovové)
- Dekontaminační textil a buničitá vata
- Izolační materiály (skelná vata a plechové pokrytí)
- Pomocné materiály (PE fólie, dřevěné zbytky, gumové hadice)
- Odpad z laboratoří (papír, guma, vata, sklo)
- Vzduchotechnické filtry (textilní, uhlíkové, vložky Firon (PVC))
- Další materiály (sklo, teflon, hliník, atd.)

### 2.4 Dělení a kategorizace RAO

Z důvodu vzniku velkého množství RAO, bylo potřeba je nějakým způsobem klasifikovat a rozdělit do vhodných skupin a podskupin. Např. dle původu odpadu, chemicky – fyzikálního složení, typu produkující radiace, velikosti aktivity apod. V níže uvedené podkapitole se budu věnovat právě tomuto rozdělení. [1]



## **2.4.1 Rozdělení RAO dle skupenství**

### **2.4.1.1 Plynné RAO**

Vznikají především odvětráváním kontaminovaných prostředí např. nádrží s aktivní vodou, či z průmyslových pracovišť, kde se využívají radioizotopy. Odstraňují se pomocí filtrů, které zachycují radioaktivní částice a snižují úroveň ozáření před vypuštěním do ovzduší. [1]

### **2.4.1.2 Kapalné RAO**

Typickým příkladem je voda z primárního okruhu JE. Ta má sice sama o sobě nízkou aktivitu, avšak soli a další částice v ní obsažené jsou hlavními nosiči záření. Po určité době musí být tato voda v systému vyměněna z důvodu nasycení právě těmito částicemi. Vodu je pak nutné vypařit a radioaktivní částice v odparcích se dále zpracovávají. [1]

### **2.4.1.3 Pevné RAO**

Nebudu-li počítat použité palivové články, tak se všeobecně jedná o už výše zmíněné ostatní technické prostředky, součásti a vybavení využívané v kontaminovaných zónách. [1]

## **2.4.2 Rozdělení RAO dle aktivity**

### **2.4.2.1 Přechodný RAO**

Přechodná aktivita značí, že radioizotopy, které odpad obsahuje, mají poločas rozpadu do pěti let. Po tuto dobu musí být skladovány. Není třeba je stínit ani chladit. Po uplynutí pěti let je přechodný RAO již považován za neradioaktivní.

### **2.4.2.2 Nízkoaktivní RAO**

Jsou to odpady tvořené především pracovními prostředky či nástroji z radioaktivních provozů. Tvoří zhruba 90 % všech RAO. Obsahují nízké množství radioizotopů, které mají poločas rozpadu asi 30 let. Stejně jako u přechodných RAO je není třeba chladit ani stínit. Ukládají se pouze do povrchových úložišť.

### **2.4.2.3 Středně aktivní RAO**

Středně aktivní RAO mají vyšší obsah radionuklidů. Kromě radioaktivity uvolňují také zbytkové teplo, proto se musí při manipulaci i skladování stínit. Jsou to látky či předměty, které přišly do styku přímo JP. Poločas rozpadu středně aktivních RAO je řádově ve stovkách let. Ukládají se v povrchových i podzemních úložištích.

#### 2.4.2.4 Vysoce aktivní RAO

Je to odpad, který tvoří asi 1 % objemu všech RAO, avšak je vysoce radioaktivní s velkým množstvím radionuklidů a dlouhodobých alfa zářičů. Uvolňuje se z něj relativně velké množství tepla, proto je nezbytné jej dobře ochlazovat a zaručit stínění před okolím. Poločas rozpadu těchto odpadů představuje celá tisíciletí, avšak nejvíce nebezpečný je zhruba prvních 300 let. Jedná se z 90 % především o PJP, které je ukládáno v hlubinných úložištích, viz kapitola 5.3. [5], [6], [8]

#### 2.4.3 Rozdělení RAO podle spalitelnosti

Existuje poměrně velké množství druhů odpadů, které lze spalovat. Zmíním zde některé skupiny rozdělené podle jejich hořlavosti a spalitelnosti. Spaliny každé ze skupin obsahují jiné množství či druhy škodlivin. Jedná se např. o: papír, buničinu a vatu, plasty, gumu, filtry, textil a organické odpady. [1]

#### 2.4.4 Rozdělení podle obsahu alfa aktivity

Z hlediska potenciální vnitřní kontaminace jsou zářiče alfa daleko nebezpečnější než zářiče beta a gama (obráceně než u rizika vnějšího ozáření). Příčina je v krátkém doběhu částic alfa – prakticky veškerá jejich energie je zachycena postiženým organismem. V *Příloze C* jsem uvedl obrázek značící pronikavost radioaktivních částic. [1]

- LLW odpady s nízkou úrovní radiace – do 370 Bq/g
- TRU transuranové odpady - nad 370 Bq/g

#### 2.4.5 Kategorizace nízko a středně aktivního RAO

Kategorie odpadu	Důležité vlastnosti
Středně aktivní Dlouze žijící	Střední beta a gama, významné alfa, střední radiotoxicita, nízký tepelný výkon
Nízkoaktivní Dlouze žijící	Nízké beta a gama, významné alfa, nízká až střední radiotoxicita, nízký tepelný výkon
Středně aktivní Krátce žijící	Střední beta a gama, nevýznamné alfa, střední radiotoxicita, nízký tepelný výkon
Nízkoaktivní Krátce žijící	Nízké beta a gama, nevýznamné alfa, nízká radiotoxicita, nevýznamný tepelný výkon

*Tabulka 2-1: Hlavní charakteristiky nízko a středně aktivního RAO [1]*

### 3. System zpracování RAO

Jedná se o soubor různých činností, které vedou ke snížení objemu odpadů za současné koncentrace radionuklidů, a ke konečné úpravě odpadů tak, aby mohly být bez problémů uloženy v dlouhodobém úložišti RAO.

#### 3.1 Minimalizace množství vznikajících RAO

Zde vycházím z pravidla, že odpad, který není vytvořen, nevyžaduje žádné finanční prostředky na likvidaci. Proto je minimalizace především ekonomicky, ale i ekologicky velmi důležitá. Musí být neoddělitelnou součástí procesu likvidace pevných RAO, bez zřetele na další zpracování, ukládání, monitorování odpadu. Minimalizace množství současně přispívá i k minimalizaci objemu RAO. To je důležité, především kvůli ukládání.

Minimalizaci je nutno brát v potaz už při projektování JE či jiného objektu, ve kterém bude vznikat RAO, tj. výstavba zařízení, umístění strojů a manipulačních prostředků. Ty musí být řešeny tak, aby bylo docíleno vzniku komplexního systému s optimální tvorbou RAO.

Další možnosti jak omezit produkci RAO nastávají při provozu jaderného zařízení a dají se rozdělit: [1]

- Optimalizace činností, které produkují RAO v procesu provozu zařízení.
- Zajištění přísného dělení a třídění odpadu ještě u zdroje vzniku, zajištění jeho kategorizace podle úrovně aktivity.
- Zmenšení množství odpadu tak, že se část zařízení či prostředků znovu použije po jejich dekontaminaci.
- Zajištění odborně vyškoleného personálu se znalostmi o produkci a manipulaci s odpadem. Tento krok je asi nejdůležitější, jelikož lidský faktor téměř vždy ovlivní výsledek a každá chyba může mít, obzvláště pak v této zodpovědné práci, vážné následky. Proto právě vzdělání a osobní přístup zaměstnanců je pro minimalizaci odpadu rozhodující.

#### 3.2 Třídění a oddělování RAO

Jakmile je množství, především pevného RAO, co nejnižší, je nutné jej roztřídit do různých skupin podle jejich stupně a druhu kontaminace a jejich fyzikálně - chemických vlastností. Důkladnost třídění výrazně ovlivňuje všechny následující operace s pevnými RAO. Optimalizace systému třídění je proto podstatná pro technické možnosti dalšího zpracování.

Před samotným tříděním se kvůli lepší manipulaci zmenší rozměry odpadu. Např. stroje a zařízení se rozmontují na montážní díly. Pokud to není možné, aplikují se běžné postupy

dělení a to mechanické (pily, řezačky s řeznými kotouči, drtiče) nebo použití elektrického oblouku či kyslíkoacetylenové řezačky.

Nízkoaktivní odpady se třídí ručně v třídících boxech, které bývají doplněny i o detektor kovu. Používají se i automatické třídíče, které třídí odpad podle jeho úrovně záření. Po roztřídění jsou odpady uloženy do pytlů či sudů, které jsou zaevidovány a je na nich označena jejich kategorie. Pak jsou posílány dál do zpracovatelského procesu. [1], [6]

### 3.3 Balení RAO

Slouží jednak jako přídavné stínění, případně kontejment pro zvýšení mechanické pevnosti a snížení kontaminace. Zaručuje lehčí manipulovatelnost a transportovatelnost odpadu.

Solidifikace a balení odpadů degraduje snahu předchozích zpracovatelských činností, které měly za úkol co nejvíce snížit objem odpadu. Obal může objem odpadu i zdvojnásobit. Nicméně balení je důležitou součástí celého procesu a je nutné je brát v úvahu při vyhodnocování a výběru techniky redukce objemu. [1]

Obal musí splňovat pravidla platné pro transport a uložení. Základními typy obalů jsou:

- Základní obalový materiál (sud, pytel)
- Transportní obal (sud s cementovou výplní, kontejner)
- Úložný obal (likvidační betonový kontejner, sud apod.)

### 3.4 Lisování

Je to metoda snižování objemu odpadového materiálu. Má za úkol zvýšit tzv. sypnou hmotnost. Tento způsob se používá především pro zpracování nízko a středně radioaktivního odpadu. Níže popisují dva základní způsoby využití této technologie, a to nízkotlaké a vysokotlaké lisování. Při lisování se používají pneumatické i hydraulické lisy. Mezi materiály, které se dají snadno lisovat, patří pěnový polystyren, filtrační papír, textil atd. [1]

#### 3.4.1 Nízkotlaké lisování

Probíhá pod tlakem od 0,3 MPa až do 5 MPa. Využívá se na malou redukci lisovaných odpadů. Tím zmenšíme objem odpadu 5 až 15 krát. Tento způsob se hodí především na ulehčení přepravy odpadu, jeho balení či k dočasnému uskladnění před dalším zpracováním. Nízkotlaké lisy pracují se zatížením do 10 tun a obvykle se lisuje do sudů o objemech 0,2 m<sup>3</sup>. Tyto sudy jsou malé, snadno se s nimi manipuluje a celá činnost je ekonomicky nenáročná. [1], [5]

### 3.4.2 Vysokotlaké lisování

Při této metodě působí tlak 5 až 35 MPa. Podle potřeby ji lze použít v kombinaci s nízkotlakým lisováním. Používá se za účelem konečné redukce objemu, s cílem dosáhnout optimální hodnoty finálního produktu. V tomto případě se jedná o co nejnížší objem, ovšem s přihlédnutím k výši nákladů na lisování.

Tímto způsobem se lisují také těžko lisovatelné materiály, mezi které patří laboratorní sklo, plastová zařízení a nástroje, či předměty z tenkých plechů. Ty se po slisování ukládají do úložných kontejnerů, či se zalijí betonem nebo asfaltem.

Výsledné výlisky mají značně zmenšený objem, ale nedochází zde ke změně fyzikálně – chemických vlastností. Objem těžko stlačitelného materiálu je až 8 krát menší oproti původnímu objemu RAO. Tuto metodu je vhodné využívat především při větším množství odpadu, protože je ekonomicky náročná a lisy těchto parametrů, i s dalšími zařízeními, jsou také vysoce náročné na prostor. [1], [5], [9]

### 3.4.3 Zásady pro konstrukci lisu

Vzduch uzavřený v balících se při lisování uvolní, aby nedošlo ke kontaminaci pracovního prostoru, musí být zajištěn důkladný odsávací systém.

Při lisování může dojít k vystříknutí případných kontaminovaných či nebezpečných kapalin, a proto je třeba zajistit kanalizační systém.

Odpad musí být před lisováním důkladně vytríděn z důvodu samozápalných či výbušných látek. Ty mohou při zvyšování tlaku během lisování negativně reagovat.

Další zásadou je před lisováním odstranit velké či nelisovatelné komponenty, které by jinak mohly poškodit lis.

Poslední a nejdůležitější zásadou při lisování RAO je zajištění bezpečnosti proti ozáření pracovníků. Středně aktivní odpad již vyžaduje dálkové ovládání z odstíněné zóny. [1]

## 3.5 Spalování

Spalování je metoda s vysokým koeficientem redukce objemu i hmotnosti pevných, ale i některých kapalných RAO. Spálit se dá až 80 % všech pevných RAO. Konečný produkt, tedy popel v sobě obsahuje až 97 % veškeré radioaktivity. Zbylé 3 % jsou ve formě spalin zachyceny pomocí systému speciálních filtrů. Radioaktivní popel je vhodná forma materiálu k další úpravě. Hodí se především k cementaci do sudů, k převozu do skladů nebo k jeho konečné likvidaci.

Spalované odpady jsou složeny z různých druhů organického materiálu, jako např. kůže, dřevo, kosti a organické kapaliny. Nebo se jedná o syntetické materiály a to zejména: papír, celulóza, textil, plasty, gumy, oleje, mazadla a rozpouštědla.

Spalovny odpadů, a to nejen radioaktivních, se v dnešní době uvádí do chodu na mnohých místech jako vhodná forma pro snižování objemu odpadů. Spalovny RAO se budují téměř ve všech zemích, které mají jaderná zařízení. V *Příloze A* jsem uvedl schéma zpracovatelského závodu na nízko a středně aktivní RAO u JE Jaslovské Bohunice. [1], [5], [9]

### 3.5.1 Faktory efektivního spalování

Pro efektivní spalovací proces musí být zajištěny tyto faktory: [1]

- Dostatečně velký objem a vhodné geometrické uspořádání spalovací komory.
- Dostatečnou dobu kontaktu spalovaného materiálu se vzduchem.
- Intenzivní promíchání hořlavých plynů se vzdušným kyslíkem.
- Dostatečnou teplotu, při které spalování probíhá.

### 3.5.2 Kinetické procesy spalování

#### 3.5.2.1 Pyrolýza

Pyrolýzou je míněn termický rozklad organických materiálů za nepřístupu médií obsahujících kyslík. Podstatou pyrolýzy je ohřev materiálu nad mez termické stability přítomných organických sloučenin, což vede k jejich štěpení až na stálé nízkomolekulární produkty a tuhý zbytek. Z technologického hlediska lze pyrolyzní procesy dále rozdělit dle dosahované teploty: [1]

- nízkoteplotní ( $< 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ )
- středně teplotní ( $500\text{ až }800\text{ }^{\circ}\text{C}$ )
- vysokoteplotní ( $> 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

### 3.5.2.2 Oxidace

Oxidace vždy navazuje na pyrolýzu, která vytváří hořlavé plyny. Ty reagují s přítomným kyslíkem a teplo, které při oxidaci vzniká. Oxidace zpětně dodává energii pyrolýze, která opět vytvoří plyny potřebné k hoření. [1]

### 3.5.2.3 Dodatečné spalování

Zajišťuje oxidaci nespálených zbytků (uhlovodíků, oxidů a sazí). Provádí se v dopalovací komoře, tzv. dopalovacím hořákem. Důležité je zajistit, aby se spaliny důkladně smísily se vzduchem. Také je třeba dostatečně dlouhý čas setrvání nespálených zbytků v této komoře, aby došlo k důkladné oxidaci. [1]

## 3.5.3 Požadavky na spalovací proces

Spalovna odpadu musí všeobecně splňovat velké množství bezpečnostních, ekonomických a ekologických kritérií. Lokalita stavby musí být dobře dopravně dostupná. Dokončené zařízení musí mít skladovací prostor pro bezpečné uložení doposud nespáleného RAO.

Velký význam se též klade na kvantitu i kvalitu spalování a systém čištění spalin. Jak lze vidět z tohoto krátkého výčtu musí projektanti spaloven porovnávat velké množství parametrů. Základní aspekty provozní spolehlivosti spalovacího systému jsou: [1]

- Kompletní spalování, při dodržení faktorů efektivního spalování z kapitoly 3.5.1.
- S přihlédnutím na charakter spalovaného odpadu správně volit vhodný čistící systém s dostatečným dekontaminačním faktorem a s dodržením emisních limitů.
- Provoz zařízení v podtlaku snižuje riziko kontaminace okolního prostředí.
- Spalovací zařízení schopné spálit co největší počet druhů odpadu.
- Automatické systémy kontrolující dodržení bezpečnostních hledisek a systém ohlášení problémů.
- Co nejmenší množství pohyblivých prvků a částí, které vyžadují pravidelnou údržbu a tím třeba i odstávku systému.

## 3.5.4 Příklady metod spalování

### 3.5.4.1 Spalování při nadbytku vzduchu

Jedná se o nejjednodušší způsob spalování. Spalovací teplota se pohybuje v rozmezí 800 až 1100 °C. Nadbytek vzduchu je 30 až 100 %. Spalovací komora má tvar válce. Na jeho dně se nachází rošt. Přebytný vzduch může způsobit nižší teplotu hoření a vyšší množství

unášeného popílku. Aby se dosáhlo úplného spálení, je třeba připojit do systému komory přídatného spalování. [1]

#### **3.5.4.2 Spalování s kontrolovaným přívodem vzduchu**

Dokonalého spálení odpadu lze dosáhnout použitím dvou spalovacích komor. V první komoře probíhá hoření v podstatě za stechiometrických podmínek ( $n = 1$ ) o teplotě do 1000 °C. Ve druhé spalovací komoře probíhá spalování o teplotě 1100 až 1500 °C. Je zde výrazný přebytek vzduchu ( $n > 1$ ) a tím je dosaženo celkového spálení odpadu. Spaliny vycházející z druhé komory už obsahují pouze malé množství popílku, avšak musí z nich být ještě odstraněna radioaktivita. Spaliny tedy prochází chladičem, kde jsou chlazeny sprchami. Dále prostupují odlučovačem, absorbérem, kondenzátorem a nakonec velmi účinným aerosolovým filtrem. [1], [5], [9]

#### **3.5.4.3 Spalovna s fluidní pecí**

Jemně drcený odpad se dávkuje do pece, kde je teplota 525 až 625 °C. Nachází se tam granulovaný uhličitán sodný ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) a ten je udržován stlačeným dusíkem a vzduchem. Uhličitán sodný slouží k neutralizaci anorganické kyseliny, které se uvolňují při spalování.

Spaliny absolvují několik fází čištění. První fáze probíhá v cyklónovém odlučovači. Zde se odděluje od spalin popílek a  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ . Ve druhé fázi jdou spaliny do dohořívací komory s oxidačním katalyzátorem. Ve třetí fázi prochází celou řadou filtrů (např. filtr ze sintrovaného kovu). V poslední fázi jdou přes chladič, ve kterém se používají další velmi účinné čistící filtry.

Fluidní spalování se používá hlavně pro spálení použitých rozpouštědel z přepracovatelského závodu a na spalování ionexů (měničů iontů). [1], [5], [9]

#### **3.5.4.4 Plazmová technologie**

Je to velmi pokročilá a progresivní forma spalování. V jednom kroku se spaluje, taví a verifikuje nízko a středně aktivní odpad. Ten se nemusí třídit, protože díky vysoké teplotě až 15 000 °C, která je vyvinuta plazmovým hořákem, je vše roztaveno. Výsledná tavenina se i s plyny separuje. Plyny postupují do komory rychlé oxidace a dále pak do systému čištění spalin. Rztavená hmota se v separační komoře vytrídí na strusku a taveninu. Tavenina se odlévá do kokil a struska se umísťuje do kontejnerů.[1]



## 4. Úprava RAO před uložením

Před jeho finálním uložením je potřeba dostat RAO do podoby, ve které bude moci být bezpečně transportován do dlouhodobého úložiště. Obecně lze říci, že finální produkt musí být upravený tak, aby radionuklidy v něm obsažené byly znehybněné v matrici, ve které se znemožní jejich únik do životního prostředí. Tomuto procesu se říká solidifikace a rozděluje se podle materiálu použitého k zakonzervování RAO. [1]

### 4.1 Bitumenace

Tato metoda se využívá pro pevné či kapalné RAO. Suchý RAO či zbytky po odpaření kapaliny se promíchají s asfaltovou emulzí. Jsou to např. ionexy, kaly z chemické precipitace, popel, koncentráty z odpadků a plastické odpady.

Porovná-li bitumenaci s cementací, tak při bitumenaci je dosahováno větší objemové redukce. Výsledná matrice je asi o 3 řády odolnější vůči vyluhování radionuklidů. Nevýhodou je např. hořlavost matrice, dlouhodobá nestabilita, nutné čištění odpadního plynu, který vzniká při bitumenaci, vyšší investiční náklady na bitumenační zařízení a také poměrně nízká teplota tání směsi.

Metoda se hojně a dlouho využívá a princip zůstává stále stejný. Vyvíjejí se však asfaltové emulze, které v současné době tvoří především destilační asfalty.

Jelikož v bitumenové matrici probíhají exotermické děje, musíme matrici chladit. To se dělá pomocí vodní lázně, ve které je bitumen ponořen. Kdyby nebyla matrice ochlazována, došlo by k hoření, při kterém by do okolí unikl nebezpečný hořlavý dým. Z tohoto důvodu jsou skladovací prostory opatřeny výkonným odsávacím systémem. [5], [9]

### 4.2 Cementace

Jedná se o zalití RAO do betonu. Využívá se už přes 40 let. Proces je technicky jednoduchý. Probíhá za studena a finančně je nenáročný, proto se stala cementace velmi rozšířenou. Dalšími výhodami jsou nehořlavost, stabilita matrice a využití pro širokou škálu odpadů.

Nevýhody jsou vysoká rychlost vyluhování radionuklidů, až 2 krát vyšší objem odpadu, problémy s tuhnutím matrice a nízká hydrolytická odolnost (odolnost proti reakcím s vodou).

Důležité kritérium je rychlost tuhnutí matrice. Tu ovlivňuje koncentrace či druh iontů, které ji mohou urychlovat, ale i zpomalovat. Např. problémy se zpomalením rychlosti tuhnutí nastávají u odpadů, ve kterých jsou ionty kyseliny borité, která se používá v chladicí vodě

v primárním okruhu JE. Najdou se však i látky, především sorbenty, které zpomalují rychlost vyluhování iontů a tím i urychlují tuhnutí matrice.

Stejně jako u bitumenace je pracovní postup stálý a nemění se, ale i zde jde rozvoj kupředu vývojem cementových směsí s lepšími vlastnostmi. Např. přidáním úletových popílků ( $\text{SiO}_2$ ) do cementu výrazně vylepšuje mechanickou pevnost matrice.

Příkladem bych uvedl tzv. super cement s aditivou z vysokopecní strusky, jenž má velmi stabilní a pevnou matici a pomáhá snížit objem odpadu až o 50 %. Výhodou je také nízká viskozita, která pomáhá při míchání a čištění míchačky. [5], [9]

### 4.3 Fixační matrice SIAL

Technologie, kterou vyvinula společnost AMEC Nuclear Slovakia, spočívá ve zpevnění RAO, ale i jiných nebezpečných materiálů, pomocí anorganické směsi. Chemické složení této dvousložkové hmoty je podobné jako u cementu, ale SIAL je daleko pevnější, kompaktnější a má vysokou odolnost proti vyluhování nebezpečných látek. Další vlastnosti, které jsou pro fixační látku velmi důležité, jsou biologická a radiační stabilita a nehořlavost.

Tyto vlastnosti získává SIAL i proto, že část iontů odpadu se při fixaci přímo chemicko – fyzikálně sváže s matricí a ostatní ionty jsou promíchány a zapouzdřeny v jejím objemu.

Další výhodou je, že SIAL může být aplikován přímo ve skladovacím místě pomocí mobilního fixačního zařízení. [10]

### 4.4 Polymerace

Moderní metoda, určená pro zpracování kapalných RAO, je založena na zafixování odpadu do umělých hmot, kterými jsou polyester, vinylester či epoxidová pryskyřice. Výhody polymerace jsou vysoká tvrdost, chemická stabilita a nízké vyluhování radionuklidů. Nevýhodou však je omezená možnost použití a vysoké náklady. Proto se používá jen tam, kde se nedá využít bitumenace či cementace. [5]

### 4.5 Vitifikace

Metoda, která se používá pro solidifikaci vysoce aktivních RAO. Principem metody je zatavení odpadu do křemíkového či boro - křemičitanového skla při teplotách 900 až 1200 °C.

Výhoda tohoto způsobu solidifikace je, že matrice má vysokou mechanickou pevnost, nízké vyluhování radioizotopů, značnou objemovou redukci a dobrou tepelnou vodivost, která se dá ještě zvýšit pomocí obalu z olova či hliníku. Nevýhodou vitifikace jsou však vysoké finanční náklady. [5]

## 5. Ukládání

V úvodu předposlední kapitoly teoretické části mé bakalářské práce bych rád připomněl, že ukládáním RAO se rozumí poslední krok na cestě od jeho vzniku. V této fázi je objem odpadu zmenšen na co nejnižší úroveň a je bezpečně solidifikován a zabalen.

Způsobů uložení použitého paliva je celá řada. Použité palivo se dočasně ukládá ve stíněných ocelových kontejnerech na 40-50 let do skladů, do vodních bazénů u jaderných reaktorů nebo mimo ně. Využívá se také uložení v betonových sklípčích nebo v betonových kontejnerech. Každá z těchto metod má své výhody a nevýhody a její využití se řídí lokálními potřebami jednotlivých jaderných elektráren. V současné době umožní definitivní uložení jaderného odpadu pouze hlubinná úložiště.

Při řešení problému ukládáním RAO je nutné brát v potaz především tři aspekty a to „bezpečnost, konstrukce, lokalita“. V každé zemi, ve které se v nějaké formě pracuje s radioaktivním materiálem, existuje nejčastěji státní instituce mající za úkol v pravidelných časových intervalech provádět měření těchto provozů. V České republice je to Státní úřad pro jadernou bezpečnost, dále jen (SÚJB).

Pravidelné monitorování úrovně radioaktivity ukládaných materiálů má faktický význam pro bezpečnost především ve vzdálené budoucnosti, kdy díky výsledkům těchto měření má např. personál přehled o tom, ve kterých místech je jak velké nebezpečí újm na zdraví.[7]

### 5.1 Uložení nízkoaktivních a středně aktivních RAO

Nízkoaktivní a středně aktivní RAO z JE či jiných provozů se předávají k uložení ve zpevněné formě nebo ve schválených obalech. Díky nízké aktivitě se mohou ukládat i do nadzemních skladů či úložišť. Konkrétní příklady úložišť jsem uvedl v kapitole 6.2. [7]

### 5.2 Uložení vysoce aktivních RAO

Vysoce aktivní odpady, představované především PJP se nejprve skladují ve speciálních kontejnerech nebo v suchých či mokřích meziskladech budovaných u JE. Zde se RAO dočasně uloží a tzv. „uklidní“. To má několik výhod, především s časem klesá radioaktivita a to usnadňuje následnou manipulaci s tímto odpadem. Také to dává zodpovědným orgánům čas vymyslet, co bude s odpady nadále. V současné době se však vysoce aktivní RAO dále převáží do hlubinných úložišť k finálnímu uskladnění. [11]

### 5.3 Hlubinné úložiště jaderného odpadu

Obecná definice praví, že je to lidmi vyhloubený, či přirozený, avšak pečlivě upravený podzemní prostor, umístěný v geologicky stabilních podmínkách. To znamená v místě, kde je nízká pravděpodobnost sopečných erupcí, zemětřesení, či záplav.

V hlubinných úložištích se RAO ukládá na dobu 40 až 100 tisíc let. Cílem stavitelů je ochránit budoucí generace před negativním vlivem uloženého odpadu. K tomu slouží bezpečnostní bariéry, viz kapitola 6.3.1. Výstavbě úložiště předchází dlouholetá finančně a administrativně náročná přípravná činnost a musí být dodrženo velké množství zákony stanovených podmínek, než může být zahájena samotná stavba. [5], [11]

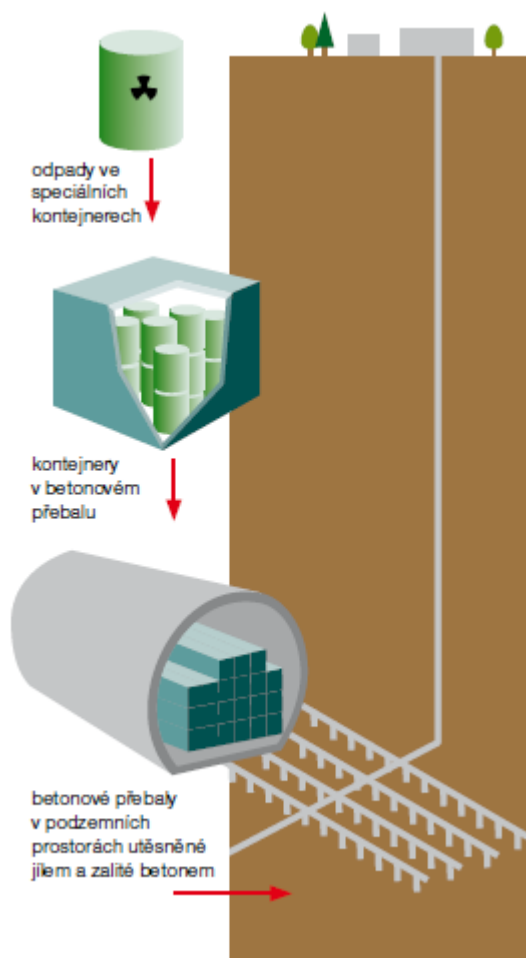
#### 5.3.1 Bezpečnostní bariéry hlubinného úložiště jaderného odpadu

**První bariérou**, která zajišťuje bezpečnost úložiště, je znehynění radionuklidů v odolné a nerozpustné chemické formě (matrici). Ta by měla RAO udržet až 1 milion let, viz kapitola 5.

**Druhá bariéra** je obal, do kterého se RAO umístí. U nízkoaktivních a středně aktivních odpadů zajišťují stínění proti záření sudy a kontejnery. Ty mají plnit tuto funkci až 600 let. Vysoce aktivní odpady jsou uloženy v silnostěnných ocelových kontejnerech nebo měděných nádobách. Izolace odpadu je řešená tak, že má vydržet celá tisíciletí, viz kapitola 3.3.

**Třetí bariéra** neboli bariéra technická reprezentována např. betonovými pakety, do nichž se ukládají sudy či kontejnery, ve kterých je RAO uložen. Dále to mohou být např. stavební konstrukce (speciální betony, nepropustné nátěry, asfaltové nebo jílové izolace a drenážní systémy).

**Čtvrtá bariéra** je nazývána také bariérou geologickou. Je to samotná hornina, v níž se úložiště nachází, viz kapitola 5.3. Formace musí být seizmicky stabilní. Dbá se na její pevnost, nerozpustnost a tepelnou stabilitu. Za příhodné geologické útvary se považují solná ložiska, jílové sedimenty, žuly a rulové horniny. Slovo stabilita zde hraje hlavní roli, jelikož geologická bariéra by měla zabránit styku RAO s prostředím na nejméně 70 milionů let. [11]



Obrázek 5-1: Bezpečnostní bariéry

## 5.4 Perspektiva: ukládání do síry

Poslední co bych rád v této kapitole zmínil je ukládání RAO do síry. Je to nadmíru progresivní projekt, který vznikl v roce 1990 v Rusku. Jedná se o ukládání jaderného odpadu (PJP, případně jiných vysoce aktivních RAO) do až pětikilometrových vrtů vyplněných nízkotavitelným a ve vodě nerozpustným materiálem - nejlépe sírou.

*„Odpad se v hermetických pouzdrech spustí do vrtu, kde vlastním teplem roztaví síru a zvýší teplotu dna vrtu asi na 500 °C. V důsledku tepelné roztažnosti hornin a chemického působení síry se průměr vrtného otvoru zvětší. Celý sloupec nahromaděného odpadu se začne posouvat dolů. Vznikne "kapka" o teplotě až 1800 °C, síra vytvoří s oxidy železa z okolních hornin pyrit. Za pomalého klesání odpad ztrácí teplotu i radioaktivitu a postup se zpomaluje. Samovolný pokles může postupovat až do 10 km (jeden vrt lze použít až třikrát). Nerozpustný pyrit tvoří matrici, která zabrání úniku radionuklidů nejméně po tři miliony let.“ [11]*

## 6. Strategie nakládání RAO v ČR

### 6.1 Minulost, současnost a budoucnost ukládání PJP v ČR

RAO z Jaderné elektrárny Dukovany se v Československu převážely do slovenské Jaderné elektrárny Jaslovské Bohunice, odkud se měly postupně odvážet na území tehdejšího SSSR. Ruská federace však po rozpadu Sovětského svazu od tohoto kroku ustoupila. Po tom co se rozpadlo i Československo byly RAO postupně převezeny do meziskladu, který byl mezitím vybudován v areálu Jaderné elektrárny Dukovany.

V současnosti jsou na území ČR dva sklady PJP a to v Jaderné elektrárně Dukovany a v Jaderné elektrárně Temelín. Nebude-li kapacita těchto dvou skladů stačit, je v plánu i vybudování meziskladu RAO v lokalitě Skalka.

Stavba hlubinného úložiště PJP na území ČR je zatím stále ve fázi záměru, viz kapitola 6.2. Veškeré činnosti spojené s jeho výstavbou, uváděním do provozu, provozem a jeho budoucím uzavřením jsou plně v kompetenci Správy úložišť radioaktivního odpadu ČR (SÚRAO). [12]

Místo skladování použitého paliva	Bazény použitého paliva	Sklady pro dočasné skladování použitého paliva	Konečné hlubinné úložiště
Doba skladování	5-13 let	Asi 60 let	Trvale
Současná situace v ČR	Jsou umístěny vedle reaktoru jaderné elektrárny. V Temelíně má každý ze dvou bazénů (na každém bloku jeden) kapacitu na 12 let provozu reaktoru.	Jsou postaveny v areálech jaderných elektráren. V Dukovanech funguje od roku 1995. V roce 2006 byl postaven druhý. V Temelíně otevřen sklad s kapacitou 1370 tun	V současné době probíhá vyhledávání lokality. Sklad by měl být připraven v roce 2065.
Financuje	Provozovatel jaderné elektrárny, akciová společnost ČEZ, ze svého rozpočtu.	Provozovatel jaderné elektrárny, akciová společnost ČEZ, ze svého rozpočtu.	Z jaderného účtu, který spravuje stát. Peníze na účet vkládají producenti odpadů cca 50 Kč na jednu vyrobenou MWh, tj. cca 1,6 miliardy Kč/rok.
Za skladování zodpovídá	Akciová společnost ČEZ jako provozovatel jaderné elektrárny.	Akciová společnost ČEZ jako provozovatel jaderné elektrárny.	Správa úložišť radioaktivních odpadů (SÚRAO) – organizace zřízená a řízená státem.
Dozor	Státní úřad pro jadernou bezpečnost.	Státní úřad pro jadernou bezpečnost.	Státní úřad pro jadernou bezpečnost.

Tabulka 6-1: Souhrn informací o úložištích RAO v ČR [12]

## **6.2 Hlubinné úložiště v ČR**

První kroky k výstavbě hlubinného úložiště PJP v ČR byly zahájeny už v roce 1990. Na začátku roku 2003 bylo, na základě důkladných geologických měření, navrženo 6 lokalit, které vyhovují bezpečnostním podmínkám pro dlouhodobé uložení vysoce aktivních RAO. Do provozu by mělo být hlubinné úložiště uvedeno kolem roku 2065. Do této doby bude PJP skladováno v kontejnerech v suchých nadzemních skladech v areálech našich JE.

V současné chvíli existuje pouze několik níže uvedených lokalit pro ukládání nízko a středně aktivních RAO. [12]

### **6.2.1 Úložiště RAO Richard**

Jedná se o bývalé důlní dílo, ve kterém se od první poloviny 19. století těžil vápenec. Nachází se pod vrchem Bídnice u Litoměřic. Za 2. světové války zde Německo vybudovalo haly pro podzemní továrnu a v roce 1964 se začalo využívat pro ukládání institucionálních RAO, převážně ve 200 litrových sudech. Podzemní prostory jsou vyztuženy železobetonem. Při výstavbě se myslelo i na kanalizaci, jež ústí do retenční jímky. Celý podzemní komplex je samozřejmě klimatizován pomocí systému ventilátorů, teplota je udržována kolem 10 °C. [13]

### **6.2.2 Úložiště Bratrství**

Tento bývalý uranový důl v Jáchymově byl v roce 1974 přestavěn na úložiště nízko a středně aktivního RAO. Podzemní prostory se zpevnily železobetonem. Klimatizace zde funguje na principu přirozené cirkulace vzduchu. Jsou zde i ventilátory, které se spouští v případě, že se v prostorách úložiště pohybují lidé. [13]

### **6.2.3 Úložiště Hostim**

Ještě bych chtěl zmínit i v současné době už uzavřený komplex Hostim u Berouna. Tento bývalý vápencový důl byl používán pro ukládání nízko a středně aktivního RAO, především z výzkumného ústavu ÚJV Řež, a to až do roku 1964. Materiál s vyšší radioaktivitou byl pak převezen do úložiště Richard. Následně bylo úložiště zaplombováno betonem a uzavřeno. [6]

### 6.3 Ukládání v Dukovanech

Úložiště nízko a středně aktivních RAO v areálu JE Dukovany bylo uvedeno do provozu v roce 1995 pro zneškodnění RAO vznikajících v jaderné energetice. Svou velikostí a kapacitou 55 000 m<sup>3</sup> je to suverénně největší a nejmodernější úložiště RAO v ČR. Vlastní konstrukcí a zabezpečením odpovídá normám platným v západoevropských státech a schopno uskladnit více než 180 000 sudů s RAO.

První suchý sklad PJP o kapacitě 600 tun (60 kontejnerů) byl uveden do provozu také v roce 1995. Nyní už je zaplněn, a proto byl ve stejné lokalitě vybudován další o kapacitě 1340 tun (133 kontejnerů). Celková kapacita obou skladů je tedy 1940 tun. To postačí JE Dukovany na 40 let.

PJP je skladováno v transportních a skladovacích kontejnerech typu Castor 440/84 s kapacitou 10 tun PJP (84 palivových kazet). To přibližně odpovídá roční produkci jednoho z reaktorů VVER 440. Životnost těchto kontejnerů je minimálně 60 let.

PJP se do kontejneru klade pod vodou přímo v reaktorové hale. Dále se kontejner vakuově vysuší a naplní heliem. Poté je ověřena jeho těsnost a je převezen do skladu, kde se umístí na příslušnou pozici a bude ochlazován přirozenou konvekcí vzduchu. [11], [13]



*Obrázek 6-1: První sklad PJP v areálu Jaderné elektrárny Dukovany, kontejner Castor*  
[12]

### 6.4 Ukládání v Temelíně

První kontejner CASTOR s PJP byl v JE Temelín uložen 8. 9. 2010. Jedná se o stejnou bezpečnou technologii, která se využívá i v JE Dukovany. Tento suchý sklad má kapacitu 1370 tun PJP, což je 152 kontejnerů CASTOR a vystačí na 30 let provozu JE Temelín. [12], [14]



## **7. Měření a hodnocení obsahu přírodních radionuklidů ve stavebních materiálech a odpadech**

### **7.1 Úvod praktické části**

V praktické části své bakalářské práce budu vycházet z informací, které jsem získal mimo jiné i ve Státním úřadě pro jadernou bezpečnost, dále jen SÚJB. Tato státní instituce vykonává dozor nad využíváním jaderné energie a ionizujícího záření v oblasti radiační ochrany a v oblasti jaderné, chemické a biologické ochrany. Měření a následné hodnocení přírodních radionuklidů do této oblasti samozřejmě spadá.

Mým úkolem bude vysvětlit z jakých zákonů a předpisů toto měření vychází, jakých materiálů se týká a jak probíhá odběr a úprava vzorků.

Dále přejdu na samotné měření. Popíši výpočetní postupy ve spektrometrii gama, způsob zpracování výsledků a výpočty indexu hmotnostní aktivity. Nakonec se budu věnovat tomu, jak se postupuje při překročení směrné a mezní hodnoty a načrtnu optimalizační opatření.

### **7.2 Rozbor legislativy**

#### **7.2.1 Atomový zákon**

Zákonem, ze kterého měření a hodnocení obsahu přírodních radionuklidů v různých materiálech vychází, je Zákon o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření, dále jen „Atomový zákon“. Požadavky na toto měření jsou stanoveny v § 6 odst. (6) Zákona č. 18/1997 Sb.

*„Výrobci a dovozci stavebních materiálů mají za úkol zajistit systematické měření a hodnocení obsahu přírodních radionuklidů a v rozsahu stanoveném prováděcím právním předpisem vést o výsledcích evidenci a oznamovat tyto údaje Úřadu. Výsledky měření jsou povinni výrobci a dovozci na vyžádání poskytnout veřejnosti. Stavební materiály se nesmí uvádět do oběhu, pokud:*

*1. obsah přírodních radionuklidů překročí mezní hodnoty stanovené prováděcím právním předpisem.*

*2. obsah přírodních radionuklidů překročí směrné hodnoty stanovené prováděcím právním předpisem, s výjimkou případů, kdy náklady spojené se zásahem ke snížení obsahu radionuklidů by byly prokazatelně vyšší než rizika zdravotní újmy.“ [15]*

## 7.2.2 Prováděcí předpisy SÚJB

Veškeré postupy a metody, které ve své bakalářské práci popíšete, a ze kterých budete vycházet, pocházejí z Vyhlášky SÚJB č. 307/2002 Sb. O radiační ochraně a z její novely Vyhlášky SÚJB č. 499/2005 Sb. Cílem těchto ustanovení je omezit ozáření ze stavebních materiálů a odpadů, při jejich dalším využití.

Radioaktivita radia je-limitujícím činitelem, ze kterého se vychází při uvádění materiálu na trh. V současné době se však sledují všechny přírodní radionuklidy. Poměrně vysoký obsah přirozeně radioaktivních prvků v půdě znevažuje správnost výsledků, a proto nelze stanovit jejich obsah přímo v místě těžby nebo výroby, ale pouze v laboratoři.

Základním kritériem pro posuzování je nově zavedený *index hmotnostní aktivity I*, jenž se počítá z aktivit tří základních prvků a to radia, thoria a draslíku. Podrobněji se tomuto tématu věnuji v kapitole 7.4.3.

Index hmotnostní aktivity je také nepostradatelný při nakládání s pevným odpadním materiálem (popílky, škvára, kaly).

Nařízení těchto prováděcích předpisů, které se týkají měření a hodnocení obsahu přírodních radionuklidů ve stavebních materiálech a odpadech, jsem shrnul v následujících tabulkách a schématu. [16]

Stavební materiál	Hmotnostní aktivita $^{226}\text{Ra}$ [Bq/kg]	
	Použití pro stavby s obytnými nebo pobytovými místnostmi	Použití výhradně pro stavby jiné než s obytnými nebo pobytovými místnostmi
Cihly a jiné stavební výrobky z pálené hlíny	150	500
Stavební výrobky z betonu, sádry, cementu a vápna		
Stavební výrobky z pórobetonu a škvárobetonu		
Stavební kámen	300	1000
Stavební výrobky z přírodního a umělého kamene, umělé kamenivo		
Keramické obkladačky a dlaždice		
Písek, štěrk, kamenivo a jíly		
Popílek, škvára, struska, sádrovec vznikající v průmyslových procesech, hlušina a kaly pro stavební účely, stavební výrobky z nich jinde neuvedené		
Materiál z odvalů, výsypek a odkališť pro stavební účely kromě radiačních činností		
Cement, vápno, sádra		

Tabulka 7-1: Mezní hodnoty obsahu přírodních radionuklidů ve stavebním materiálu [17]

## Měření a hodnocení obsahu přírodních radionuklidů

Dojde-li k překročení směrné hodnoty, viz kapitola 7.5.2, mohou se materiály, které se využívají bezprostředně ke stavbě, zavádět na trh pouze v případech jsou-li náklady určené ke snížení obsahu radionuklidů prokazatelně vyšší než rizika ohrožení zdraví či životního prostředí. Když je však směrná hodnota překročena u materiálů, sloužících jako surovina pro materiály s vyšším produkčním ekvivalentem, má výrobce či prodejce těchto materiálů za povinnost pouze informovat kupujícího o obsahu přírodních radionuklidů.

Stavební materiál	Index hmotnostní aktivity
Stavební materiály určené ke stavbě zdí, stropů a podlah ve stavbách s obytnými nebo pobytovými místnostmi zejména zdící prvky, prefabrikované výrobky, tvárnice, cihly, beton a sádrokarton	0,5
Ostatní stavební materiály určené k použití ve stavbách s obytnými nebo pobytovými místnostmi	1
Stavební materiály určené k použití jinému než ve stavbách s obytnými nebo pobytovými místnostmi, veškeré stavební materiály určené výhradně k použití jako surovina pro výrobu stavebních materiálů	2

*Tabulka 7-2: Směrné hodnoty obsahu přírodních radionuklidů ve stavebním materiálu*

[16]

Za systematické se považuje změření hmotnostních aktivit  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Th}$  a  $^{40}\text{K}$ , vykonané při vydání materiálu na trh a další, které jsou prováděny v časových intervalech podle Tabulky 7-3.

Stavební materiál	Četnost rozborů
Stavební materiály určené ke stavbě zdí, stropů a podlah ve stavbách s obytnými nebo pobytovými místnostmi zejména zdící prvky, prefabrikované výrobky, tvárnice, cihly, beton a sádrokarton	Jednou za rok
Ostatní stavební materiály určené k použití ve stavbách s obytnými nebo pobytovými místnostmi	Jednou za dva roky
Stavební materiály určené k použití jinému než ve stavbách s obytnými nebo pobytovými místnostmi, veškeré stavební materiály určené výhradně k použití jako surovina pro výrobu stavebních materiálů	Jednou za pět let

*Tabulka 7-3: Rozsah rozborů obsahu přírodních radionuklidů ve stavebním materiálu*

[17]

V přílohách jsem uvedl blokové schéma, viz *Příloha D*, které popisuje postup a rozhodovací kritéria při měření a hodnocení přírodních radionuklidů. Tento postup se aplikuje na jakýkoliv měřený vzorek. Pomáhá laboratoři při vyhodnocení konkrétních výsledků a při překročení směrné či mezní hodnoty navrhuje další naložení s měřeným materiálem.

### 7.3 Odběr a úprava vzorků

Vzorky jsou odebírány přímo u výrobce či dovozce materiálu a to pokud možno v neupravované podobě. Vzorek odebírá buďto pověřený odborník z atestované laboratoře nebo si jej výrobce může odebrat i sám. V takovém případě musí spolu se vzorkem materiálu poslat do laboratoře i protokol s podrobným popisem vzorku. Protokoly jsou k dispozici na internetových stránkách SÚJB či je poskytne konkrétní laboratoř. Příklad protokolu o odběru odpadu jsem uvedl v *Příloze E*.

V této části je nutné podotknout, že protokol o odběru odpadního materiálu je odlišný od protokolu pro odběr stavebního materiálu, a že konkrétní postupy odběru či úpravy vzorků před měřením, jsou závislé na požadavcích laboratoře.

Příkladem bych uvedl brněnskou laboratoř, kde je požadován maximální objem vzorku do 500 cm<sup>3</sup> či do 1 kg hmotnosti. Dále se vyžaduje suchý a podrcený vzorek se zrnitostí do 5 mm. [18]

### 7.4 Měření vzorků

Měření smí provádět pouze laboratoře, které mají povolení od SÚJB. Seznamy těchto míst lze nalézt na webových stránkách úřadu. Samotný měřicí proces v sobě obsahuje stanovení hmotnostních aktivit radionuklidů <sup>226</sup>Ra, <sup>228</sup>Th a <sup>40</sup>K, výpočet nejistoty měření a výpočet indexu hmotnostní aktivity *I*. Měřicí přístroje (viz kapitola 7.4.1.1 a 7.4.1.2) musí být kalibrovány a musí odpovídat Zákonu č. 505/1990 Sb. o metrologii. [17]

V *Příloze F* jsem uvedl tabulku a grafické znázornění poločasu rozpadu měřených radionuklidů.

#### 7.4.1 Měřicí a výpočetní metody spektrometrie gama

Pro měření a hodnocení radionuklidů ve stavebních materiálech a v odpadu se využívá faktu, že každý přírodní radionuklid vyzařuje určité množství gama záření. Tato emitovaná energie je pro každý prvek specifická a udává se v [keV]. Díky tomu můžeme v měřeném vzorku určit jaké radionuklidy vyzařuje. Pro přehlednost jsem uvedl v níže uvedené tabulce příklady radionuklidů, které využiji i v modelovém příkladu v kapitole 8. [19]

Radionuklid	Chemická značka	Emitovaná energie [keV]
Radium	<sup>226</sup> Ra	338
Thorium	<sup>228</sup> Th	2614
Draslík	<sup>40</sup> K	1461

Tabulka 7-4: Emise vybraných radionuklidů [19]

### 7.4.1.1 Scintilační spektrometrie gama

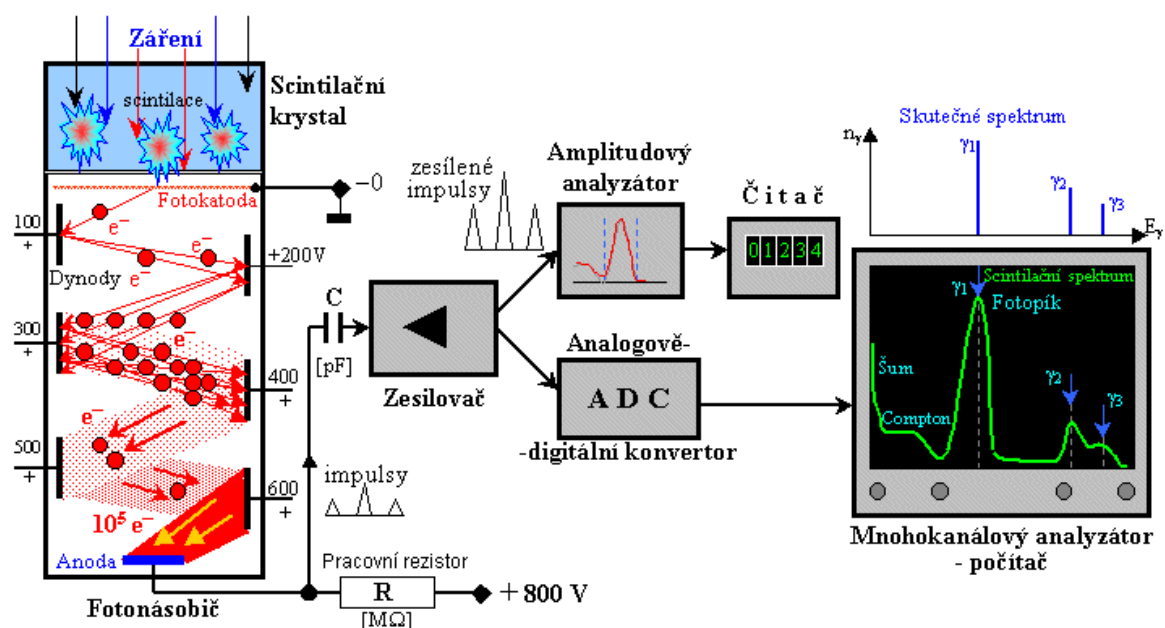
Tato metoda pracuje na principu „scintilace, což je jev, při kterém vznikají slabé světelné záblesky (pulsy světla) v některých látkách při dopadu ionizujícího záření (krátce po průchodu ionizované částice).“ Jako scintilátory se využívají z organických látek např. antracén, naftalen a z anorganických látek je to třeba síran zinečnatý (ZnS), který se aktivuje pomocí stříbra nebo mědi.

Aby však bylo možno detekovat jednotlivé pulsy fotonů, je třeba využít fotonásobiče. Fotony narážejí na fotokatody, kde dochází k fotoelektrickému jevu (vyrazení elektronů nad povrch katody). Elektrony se pak urychlují díky elektrickému napětí mezi jednotlivými dynodami (elektrodami). S každým dalším dopadem elektronů se jejich rychlost i počet zvyšuje, až dopadnou na fotoanodu.

Na níže uvedeném schématu (Obrázek 7-2) je zleva vidět ionizační záření emitující průchodem scintilátoru foton, který při nárazu na fotokatodu vyráží elektrony. Ty jsou usměrňovány pomocí elektrod. Jejich počet postupně vzrůstá až do nárazu na fotoanodu. Na této elektrodě jsou pomocí elektrických konektorů přeměňovány na elektronický signál. [20], [22]



Obrázek 7-1: Scintilační detektor [23]



Obrázek 7-2: Schéma scintilačního detektoru (horní větev) a spektrometru (dolní větev) [20]

### 7.4.1.1.1 Hmotnostní aktivita jednotlivých radionuklidů

Hmotnostní aktivitu jednotlivých radionuklidů  $a_k$  vypočtu z hmotnosti vzorku  $m$ , kalibračních koeficientů  $c_{ki}$ , naměřeného počtu impulzů od vzorku  $N_{vi}$ , počtu impulzů pozadí  $N_{pi}$ , doby měření vzorku  $t_v$ , doby měření pozadí  $t_p$  ze vztahu: [17]

$$a_k = \frac{1}{m} \cdot \sum_{i=1}^3 c_{ki} \cdot \left( \frac{N_{vi}}{t_v} - \frac{N_{pi}}{t_p} \right) \quad [Bq / kg] \quad (7.1)$$

### 7.4.1.1.2 Standardní nejistota

Standardní nejistota  $u_k$  se počítá z hmotnosti vzorku  $m$ , kalibračních koeficientů  $c_{ki}$ ,  $N_{vi}$ , počtu impulzů pozadí  $N_{pi}$ , doby měření vzorku  $t_v$ , doby měření pozadí  $t_p$  ze vztahu: [17]

$$u_k = \frac{1}{m} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^3 c_{ki}^2 \cdot \left( \frac{N_{vi}}{t_v^2} - \frac{N_{pi}}{t_p^2} \right)} \quad [Bq / kg] \quad (7.2)$$

### 7.4.1.1.3 Relativní standardní nejistota

Relativní standardní nejistota  $u_{rk}$  se vypočítá jako podíl standardní nejistoty  $u_k$  a hmotnostní aktivity jednotlivých radionuklidů  $a_k$  vzorcem: [17]

$$u_{rk} = \frac{100 \cdot u_k}{a_k} \quad [\%] \quad (7.3)$$

### 7.4.1.1.4 Nejmenší detekovaná hmotnostní aktivita

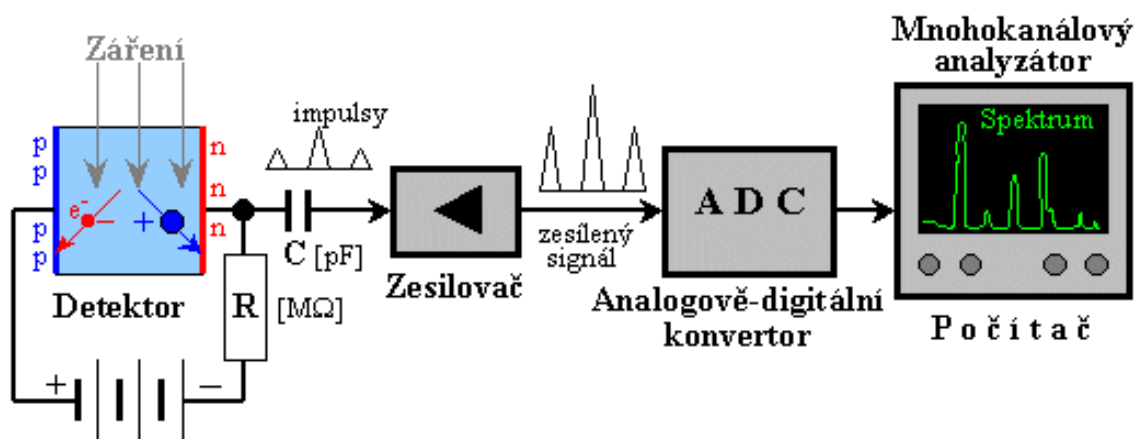
Nejmenší detekovaná hmotnostní aktivita  $a_{ND,k}$  se spočítá z hmotnosti vzorku  $m$ , doby měření pozadí  $t_p$ , účinnosti detekce k-tého radionuklidu  $\eta_{kk}$ , doby měření vzorku  $t_v$ , kalibračních koeficientů  $c_{ki}$ , hmotnostní aktivity radionuklidu  $a_i$ , standardní nejistoty  $u_k$  a počtu impulzů pozadí  $N_{pk}$  vztahem: [17]

$$a_{ND,k} = \frac{3,29}{m \cdot t_p \cdot \eta_{kk}} \cdot \sqrt{\frac{m \cdot t_p^2}{t_v} \cdot \sum_{i=k} c_{ki} \cdot a_i + m^2 \cdot t_p^2 \cdot \sum_{i=1} c_{ki}^2 \cdot u_k^2 + N_{pk} \cdot \left( 1 + \frac{t_p}{t_v} \right)} \quad [Bq / kg] \quad (7.4)$$

### 7.4.1.2 Polovodičová spektrometrie gama

Polovodičová spektrometrie gama vychází ze schopností některých polovodičů uvolňovat volné elektrony při působení ionizujícího záření. Působí-li na tyto polovodiče vnější napětí, jsme schopni měřit proudové pulzy. Při tomto ději vzniká poměrně velké množství šumu, který by měření znehodnocoval, proto se detektory chladí kapalným dusíkem.

Níže jsem uvedl schéma (Obrázek 7-3), kde nalevo lze vidět komoru, ve které jsou polovodiče, na něž působí ionizační záření. Tyto polovodiče jsou připojeny na vnější napěťový zdroj. Vznikající proudové pulzy postupují dále přes zesilovač (signál je v tomto případě mnohem silnější než u scintilační spektroskopie, proto není třeba dalšího zesilování). Tento zesílený signál se dále převede pomocí analogově digitálního konvertoru na využitelný druh signálu, který se pomocí počítače vyhodnocuje dle potřeby obsluhy. [20]



Obrázek 7-3: Schéma polovodičového fotodetektoru [20]

Nejčastěji se využívají detektory HPGe (High Purity Ge), viz Obrázek 7-4, polovodiče jsou z vysoce čistého Germania. Při měření se musí zvolit oblast zájmu, jejíž analýzu provedu v následujícím obecném výpočtu. [24]



Obrázek 7-4: Polovodičový detektor HPGe [24]

### 7.4.1.2.1 Plocha píku

Pík je křivka zvonovitého tvaru. Ukazuje závislost dvou proměnných veličin. Plochu píku  $Pl$  lze spočítat z doby měření vzorku  $t_v$ , celkového počtu impulzů v kanálech, ze kterých je stanovena plocha píku  $N_A$ , celkového počtu impulzů v kanálech, ze kterých je stanovena základna pod píkem  $N_B$ , počtu kanálů v oblasti zájmu, ze kterých je stanovena plocha píku  $k_A$ , počtu kanálů v oblasti zájmu, ze kterých je stanovena základna pod píkem  $k_B$ , plochy píku ve spektru pozadí  $P_p$  doby měření pozadí  $t_p$  ze vztahu: [17]

$$Pl = \frac{1}{t_v} \cdot \left( N_A - N_B \cdot \frac{k_A}{k_B} - P_p \cdot \frac{t_v}{t_p} \right) \quad [imp/s] \quad (7.5)$$

### 7.4.1.2.2 Standardní nejistota plochy píku

Standardní nejistotu plochy píku  $u_{Pl}$  vypočítám pomocí doby měření vzorku  $t_v$ , celkového počtu impulzů v kanálech, ze kterých je stanovena plocha píku  $N_A$ , celkového počtu impulzů v kanálech, ze kterých je stanovena základna pod píkem  $N_B$ , počtu kanálů v oblasti zájmu, ze kterých je stanovena plocha píku  $k_A$ , počtu kanálů v oblasti zájmu, ze kterých je stanovena základna pod píkem  $k_B$ , standardní nejistoty plochy píku ve spektru pozadí  $u_p$  a doby měření pozadí  $t_p$  ze vztahu: [17]

$$u_{Pl} = \frac{1}{t_v} \cdot \sqrt{N_A + N_B \cdot \frac{k_A^2}{k_B^2} + \left( u_p \cdot \frac{t_v}{t_p} \right)^2} \quad [imp/s] \quad (7.6)$$

### 7.4.1.2.3 Nejmenší detekovatelná plocha píku

Nejmenší detekovatelná plocha píku  $Pl_{ND}$  se vypočítá z doby měření vzorku  $t_v$ , celkového počtu impulzů v kanálech, ze kterých je stanovena základna pod píkem  $N_B$ , počtu kanálů v oblasti zájmu, ze kterých je stanovena plocha píku  $k_A$ , počtu kanálů v oblasti zájmu, ze kterých je stanovena základna pod píkem  $k_B$ , plochy píku ve spektru pozadí  $P_p$ , doby měření pozadí  $t_p$  a standardní nejistoty plochy píku ve spektru pozadí  $u_p$  pomocí vzorce: [17]

$$Pl_{ND} = \frac{2,71}{t_v} + \frac{4,39}{t_v} \cdot \sqrt{N_B \cdot \frac{k_A}{k_B} \cdot \left( 1 + \frac{k_A}{k_B} \right) + P_p \cdot \frac{t_v}{t_p} + \left( u_p \cdot \frac{t_v}{t_p} \right)^2} \quad [imp/s] \quad (7.7)$$



**7.4.1.2.4 Hmotnostní aktivita**

Hmotnostní aktivitu měřeného vzorku  $a$  mohu spočítat z plochy píku  $Pl$ , opravného faktoru samoabsorpce  $F_a$ , opravného faktoru na skutečné koincidence  $F_c$  (časového souběhu), hmotnosti měřeného vzorku  $m$ , fotopíkové detekční účinnosti  $\eta_p$  a výtěžku fotonů gama na 100 přeměn radionuklidu  $\gamma$  ze vztahu: [17]

$$a = \frac{10^4 \cdot Pl \cdot F_a \cdot F_c}{m \cdot \eta_p \cdot \gamma} \quad [Bq / kg] \quad (7.8)$$

**7.4.1.2.5 Nejmenší detekovatelná hmotnostní aktivita**

Nejmenší detekovatelnou hmotnostní aktivitu  $a_{ND}$  mohu spočítat z nejmenší detekovatelné plochy píku  $Pl_{ND}$ , opravného faktoru samoabsorpce  $F_a$ , opravného faktoru na skutečné koincidence  $F_c$  (časového souběhu), hmotnosti měřeného vzorku  $m$ , fotopíkové detekční účinnosti  $\eta_p$  a výtěžku fotonů gama na 100 přeměn radionuklidu  $\gamma$  ze vztahu: [17]

$$a_{ND} = \frac{10^4 \cdot Pl_{ND} \cdot F_a \cdot F_c}{m \cdot \eta_p \cdot \gamma} \quad [Bq / kg] \quad (7.9)$$

**7.4.1.2.6 Standardní nejistota**

Standardní nejistotu  $u_r$  vypočtu jako podíl standardní nejistoty plochy píku  $u_{Pl}$  a plochy píku  $Pl$  vztahem: [17]

$$u_r = 100 \cdot \frac{u_{Pl}}{Pl} \quad [Bq / kg] \quad (7.10)$$

**7.4.1.2.7 Relativní standardní nejistota**

Relativní standardní nejistotu  $u$  vypočítám z hmotnostní aktivity radionuklidu  $a$  standardní nejistoty plochy píku  $u_{Pl}$  a plochy píku  $Pl$  vztahem: [17]

$$u = a \cdot \frac{u_{Pl}}{Pl} \quad [\%] \quad (7.11)$$

### 7.4.2 Zpracování výsledků

Při použití obou metod je hlavním výstupem hmotnostní aktivita jednotlivých radionuklidů. Ta se využije dále ve výpočtu, který jsem uvedl v modelovém příkladu v kapitole 8. Druhým výstupem jsou standardní nejistoty použité měřicí metody.

Chybou - nejistotou měření se rozumí parametr, který se přidruží k výsledku měření. Tento parametr charakterizuje rozptýlení hodnot, které lze odůvodněně pokládat za hodnotu veličiny, která je objektem měření. Nejistotu měření ovlivňují různé zdroje, např. nevhodný výběr přístroje, vzorku či metody, zaokrouhlování, vlivy prostředí, nedodržení podmínek při opakovaném měření, lidský faktor nebo nepřesnosti použitých měřících přístrojů.

Musím však zdůraznit, že nejistotu měření není třeba počítat, když je splněna podmínka: *Hmotnostní aktivita radionuklidu je menší než nejmenší detekovatelná hmotnostní aktivita*  $a < a_{ND}$ . V tomto případě je gama záření, které vyzařuje zkoumaný vzorek zanedbatelné.

Měřený ukazatel	Mez detekce	Nejistota měření
Hmotnostní aktivita $^{40}\text{K}$	$< 150 \text{ Bq/kg}$	$< 10 \%$
Hmotnostní aktivita $^{226}\text{Ra}$	$< 15 \text{ Bq/kg}$	$< 10 \%$
Hmotnostní aktivita $^{228}\text{Th}$	$< 10 \text{ Bq/kg}$	$< 10 \%$

Tabulka 7-5: Mezní hodnoty detekce hmotnostní aktivity a nejistoty měření [17]

V této tabulce jsou uvedeny mezní hodnoty nejmenší detekované hmotnostní aktivity pro jednotlivé měřené radionuklidy a nejistoty měření. Pokud však není splněna výše uvedená podmínka ( $a < a_{ND}$ ) provede se tento výpočet: [17], [21]

#### 7.4.2.1 Relativní kombinovaná standardní nejistota

Relativní kombinovanou standardní nejistotu  $u_r$  vypočtu z druhé odmocniny součtu kvadrátů dílčích standardních nejistot  $u_{ri}$ : [17]

$$u_r = \sqrt{\sum_i u_{ri}^2} \quad [\%] \quad (7.12)$$

#### 7.4.2.2 Kombinovaná standardní nejistota

Kombinovaná standardní nejistota  $u$  se vypočítá z relativní standardní nejistoty  $u_r$  a hmotnostní aktivity radionuklidu  $a$  vztahem: [17]

$$u = \frac{u_r \cdot a}{100} \quad [\text{Bq} / \text{kg}] \quad (7.13)$$

### 7.4.2.3 Relativní rozšířená nejistota

Relativní rozšířená nejistota  $U_r$  se určuje z relativní standardní nejistoty  $u_r$  jako: [17]

$$U_r = 2 \cdot u_r \quad [\%] \quad (7.14)$$

### 7.4.2.4 Rozšířená nejistota

Rozšířená nejistota  $U$  se vypočítá z kombinované standardní nejistoty  $u$  vztahem: [17]

$$U = 2 \cdot u \quad [Bq / kg] \quad (7.15)$$

## 7.4.3 Výpočet indexu

### 7.4.3.1 Index hmotnostní aktivity

Index hmotnostní aktivity  $I$  se spočítá z hmotnostní aktivity radionuklidů  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Th}$   $a_K$ ,  $a_{Ra}$ ,  $a_{Th}$  ze vztahu: [17]

$$I = \frac{a_K}{3000} + \frac{a_{Ra}}{300} + \frac{a_{Th}}{200} \quad [1] \quad (7.16)$$

### 7.4.3.2 Nejmenší detekovatelná hodnota indexu hmotnostní aktivity

Nejmenší detekovatelná hodnota indexu hmotnostní aktivity  $I_{ND}$  se spočítá z nejmenší detekovatelné hmotnostní aktivity radionuklidů  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Th}$   $a_{ND,K}$ ,  $a_{ND,Ra}$ ,  $a_{ND,Th}$  ze vztahu: [17]

$$I_{ND} = \frac{a_{ND,K}}{3000} + \frac{a_{ND,Ra}}{300} + \frac{a_{ND,Th}}{200} \quad [1] \quad (7.17)$$

V této fázi výpočtu musím porovnat hodnotu indexu hmotnostní aktivity  $I$  a nejmenší detekovatelné hodnoty indexu hmotnostní aktivity  $I_{ND}$ . Je-li splněna podmínka  $I < I_{ND}$  značí to, že výsledný index je pod mezí detekce. Není-li tomu tak, provede se následující výpočet.

### 7.4.3.3 Standardní nejistota indexu hmotnostní aktivity

Standardní nejistota indexu hmotnostní aktivity  $u_I$  se vypočte kombinovaných standardních nejistot hmotnostních aktivit radionuklidů  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Th}$   $u_K$ ,  $u_{Ra}$ ,  $u_{Th}$  ze vztahu: [17]

$$u_I = \sqrt{\left(\frac{u_K}{3000}\right)^2 + \left(\frac{u_{Ra}}{300}\right)^2 + \left(\frac{u_{Th}}{200}\right)^2} \quad [1] \quad (7.18)$$

**7.4.3.4 Relativní standardní nejistota indexu hmotnostní aktivity**

Relativní standardní nejistotu indexu hmotnostní aktivity  $u_{Ir}$  vypočítám ze standardní nejistoty indexu hmotnostní aktivity  $u_I$  a indexu hmotnostní aktivity  $I$  ze vztahu: [17]

$$u_{Ir} = 100 \cdot \frac{u_I}{I} \quad [\%] \quad (7.19)$$

**7.4.3.5 Rozšířená relativní nejistota indexu hmotnostní aktivity**

Rozšířenou relativní nejistotu indexu hmotnostní aktivity mohu spočítat  $U_{Ir}$  z relativní standardní nejistoty indexu hmotnostní aktivit  $u_{Ir}$  ze vztahu: [17]

$$U_{Ir} = 2 \cdot u_{Ir} \quad [\%] \quad (7.20)$$

**7.4.3.6 Rozšířená nejistota indexu hmotnostní aktivity**

Rozšířená nejistota indexu hmotnostní aktivity  $U_I$  se vypočte ze standardní nejistoty indexu hmotnostní aktivity  $u_I$  ze vztahu: [17]

$$U_I = 2 \cdot u_I \quad [\%] \quad (7.21)$$

**7.4.4 Vyjadřování a hodnocení výsledků**

Vyjádření výsledků hmotnostní aktivity závisí na podmínce  $a < a_{ND}$ . Je-li tato podmínka splněna, zapisuje se výsledek jako  $< a_{ND} [Bq/kg]$ . Není-li splněna, uvádí se jako výsledek hmotnostní aktivita  $a [Bq/kg]$  a rozšířená nejistota  $U [Bq/kg]$  a nebo relativní rozšířená nejistota  $U_r [\%]$ .

Druhá forma výsledku je index hmotnostní aktivity. Ten opět závisí na podmínce  $I < I_{ND}$ . Je-li tato podmínka splněna, zapisuje se výsledek jako  $< I_{ND} [1]$ . Není-li splněna, uvádí se jako výsledek index hmotnostní aktivity  $I [1]$  a rozšířená nejistota  $U_I [1]$  a nebo relativní rozšířená nejistota  $U_{Ir} [\%]$ .

Výsledky měření se dále hodnotí podle tabulek, které jsou uvedeny v *Přílohách G a H*. Všechny tyto hodnoty a další potřebné údaje se zapíší do protokolu o měření. Musí být v souladu s vyhláškami z kapitoly 7.2.2. Příklad protokolu jsem uvedl v *Příloze E*. Výsledky jsou odesílány zadavateli měření, nejčastěji výrobci a také do SÚJB. [17]

## 7.5 Postup při překročení mezní a směrné hodnoty

### 7.5.1 Překročení mezní hodnoty

*Mezní hodnota je určitá limitující hmotnostní aktivita radionuklidu  $^{226}\text{Ra}$  [Bq/kg] v měřeném vzorku.* Je dána pro jednotlivé třídy materiálů z vyhlášek SÚJB, viz kapitola 7.2.2 Tabulka 7-1. Existují dvě eventuality, které je třeba zohlednit.

První nastává, převyšuje-li hmotnostní aktivita radionuklidu  $^{226}\text{Ra}$  [Bq/kg] mezní hodnotu z Tabulky 7-1. Jinak řečeno výsledek měření je větší než mezní hodnota o hodnotu větší než jeho rozšířená nejistota  $U$ . Dospěje-li měření do tohoto stavu, musí být produkce měřeného materiálu na trh okamžitě zastavena a musí být provedeny další kontrolní testy. Potvrdí-li i opakovaná měření stejný problém, musí být zahájena opatření, dle „Atomového zákona“, viz kapitola 7.2.1, za účelem snížení hmotnostní aktivity  $^{226}\text{Ra}$ .

Druhá alternativa výsledků měření nastává, když překročení mezní hodnoty nelze spolehlivě vyvrátit ani potvrdit. To znamená, že se výsledek měření liší od mezní hodnoty hmotnostní aktivity o méně než jeho rozšířenou nejistotu. I v tomto případě se provádějí další kontrolní měření pokud možno s vyšší přesností, aby se zabránilo opakované nejistotě. Je-li výsledek opět vyšší než mezní hodnota, postupuje se dále jako v prvním případě. [15]

### 7.5.2 Překročení směrné hodnoty

*Směrná hodnota je maximální povolená hodnota indexu hmotnostní aktivity v měřeném vzorku.* Je dána pro třídy materiálů, z vyhlášek SÚJB, viz kapitola 7.2.2 a Tabulka 7-2.

Je-li index hmotnostní aktivity měřeného vzorku vyšší než směrná hodnota a nejsou-li náklady na snížení obsahu přírodních radionuklidů ve stavebních materiálech a odpadech vyšší než rizika poškození zdraví, nesmí být tento materiál uveden na trh. Tímto opatřením se tzv. optimalizuje radiační ochrana, viz kapitola 7.6. Jinak řečeno snižuje se úroveň ozáření. Dle „Atomového zákona“ existuje postup, který se však provádí pouze v případě, je-li překročena směrná hodnota indexu hmotnostní aktivity o více než 20 %.

Měří se nejméně další tři vzorky. Zjišťuje se, zda je hodnota indexu hmotnostní aktivity vyšší než jeho rozšířená nejistota a současně je-li hmotnostní aktivita  $^{226}\text{Ra}$  menší než mezní hodnota z Tabulky 7-2. Pokud ano, přistupuje se k výpočtu efektivní dávky zevního ozáření. [15]

### 7.5.2.1 Výpočet dávky zevního ozáření

„Sievert, jako takový je jednotkou dávkového ekvivalentu  $H$ , jenž udává hodnotu biologického účinku různých druhů ionizujícího záření.“ Zevní dávka ozáření  $E$  [ $\mu\text{Sv}/\text{rok}$ ] tedy značí, jakou dávku ionizačního záření obdrží např. člověk za určitý časový interval. [25]

Pro výpočet zevní dávky ozáření se materiály dělí do skupin dle svého využití. Tyto skupiny jsem uvedl níže v tabulce. Rozdělení je nutné, především kvůli koeficientu zevní dávky ozáření pozadí  $F_p$ , který je pro materiály využívané ke stavbě obytných budov roven nule. Hodnoty koeficientů pro jednotlivé skupiny jsem zprostředkoval v Příloze G.

A	materiály použitelné pro stavbu obytných nebo pobytových místností ve významném množství	například: beton, cihly, tvárnice, vnitřní omítky, obklady, dlažba
B	ostatní stavební materiály použitelné uvnitř obytných nebo pobytových místností	
C	materiály použitelné pro stavbu budov s obytnými nebo pobytovými místnostmi ve významném množství, a to výhradně vně obytných a pobytových místností	například: materiály používané pro zakládání staveb, střešní krytina
D	ostatní materiály použitelné pro stavbu budov s obytnými nebo pobytovými místnostmi, a to výhradně vně obytných a pobytových místností	například: vnější omítky, vnější obklady, schodiště
E	materiály použitelné výhradně pro stavby bez obytných a pobytových místností	například materiály pro stavbu silnic, železnic

Tabulka 7-6: Rozdělení materiálů dle využití [17]

Zevní dávka ozáření  $E$  se tedy vypočítá z hmotnostní aktivity radionuklidů  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Th}$   $a_K$ ,  $a_{Ra}$ ,  $a_{Th}$  a koeficientů pro jednotlivé radionuklidy a pozadí  $F_K$ ,  $F_{Ra}$ ,  $F_{Th}$  a  $F_p$ , ze vztahu:

$$E = a_K \cdot F_K + a_{Ra} \cdot F_{Ra} + a_{Th} \cdot F_{Th} - F_p \quad [\mu\text{Sv}/\text{rok}] \quad (7.22)$$

## 7.6 Optimalizační postupy

Optimalizační postupy se zakládají na porovnání předpokládaných nákladů na uskutečnění opatření a jejich přínosu spojeného se snížením rizika z radionuklidů přítomných ve stavebním materiálu. [17]

Aplikují se, když index hmotnostní aktivity převyšuje směrnou hodnotu z Tabulky 7-2. Zároveň efektivní dávka ze zevního ozáření převyšuje úroveň 300 [ $\mu\text{Sv}/\text{rok}$ ] a kdy současně hmotnostní aktivita radionuklidu  $^{226}\text{Ra}$  nepřevyšuje mezní hodnotu z Tabulky 7-1.

Základní opatření jsou:

- Změna samotné suroviny s vyšším obsahem přírodních radionuklidů
- Změna množství suroviny s vyšším obsahem přírodních radionuklidů
- Lepší homogenizace a třídění surovin
- Změna zdroje samotného materiálu

### 7.6.1 Hodnota přínosu opatření

Hodnota přínosu opatření  $P$  se vypočítá z očekávaných změn hmotnostních aktivit radionuklidů  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Th}$   $\Delta a_K$ ,  $\Delta a_{Ra}$ ,  $\Delta a_{Th}$ , koeficientem emanace radonu  $k_{Rn}$ , přínosem opatření ze snížení hmotnostní aktivity  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Th}$   $f_K$ ,  $f_{Ra}$ ,  $f_{Th}$ , a přínosem opatření ze snížení emise radonu  $f_{Rn}$ , ze vztahu: [17]

$$P = f_K \cdot \Delta a_K + f_{Th} \cdot \Delta a_{Th} + (f_{Ra} + f_{Rn} \cdot k_{Rn}) \cdot \Delta a_{Ra} \quad [\text{Kč} / \text{m}^3] \quad (7.23)$$

Hodnoty přínosu opatření ze snížení hmotnostní aktivity  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Th}$   $f_K$ ,  $f_{Ra}$ ,  $f_{Th}$ , a přínosem opatření ze snížení emise radonu  $f_{Rn}$  jsou uvedeny v Příloze H.

### 7.6.2 Koeficient emanace radonu

Pojem emanace je uváděn jako souhrnný název pro prvek, který vznikne v plynném skupenství při radioaktivním rozpadu látky ve skupenství tuhém. Koeficient emanace radonu uvedený výše ve výpočtu se určí pro jednotlivé materiály a odpady z tabulky

Materiál	Koeficient emanace [%]
Stavební kámen	10,9
Cihly	1,5
Beton	22,5
Pórobeton	26,0
Škvárobeton	5,7
Malty	13,2
Omítky	6,6
Písek	14,5
Popílek škvára	2,0

Tabulka 7-7: Průměrné koeficienty emanace radonu pro vybrané materiály a odpady [17]

## 8. Modelový příklad

### 8.1 Úvod příkladu

Tepelné elektrárny a teplárny produkují v České republice každý rok miliony tun popílku. Ten se ve většině případů kupí a bez dalšího využití pouze hyzdí krajinu. Z odborných článků jsem zjistil, že čeští vědci úspěšně experimentují s vývojem betonu bez cementu „geopolymerního betonu“, jenž obsahuje z 90 % elektrárenský popílek. Mimo to je tento beton odolnější vůči kyselinám a vysokým teplotám. [26], [27]

Můj modelový příklad bude vycházet z elektrárenského popílku, jenž bude chtít výrobce betonu využít do svého produktu. Tento beton však nejprve musí projít měřením a hodnocením obsahu přírodních radionuklidů. Z důvodu citlivosti konkrétních údajů od výrobců a ochrany autorských práv měřicích laboratoří, skutečné hodnoty modifikuji a konkrétní upravená místa doplním příslušnými komentáři o zjednodušení, které musím provést.

### 8.2 Zadání

Mějme geopolymerní beton s obsahem elektrárenského popílku 85 %. Tento beton je využit na výrobu tvárnic, které se používají na stavby s obytnými nebo pobytovými místnostmi.

Pro uvedení tohoto produktu na trh bylo nutné provést měření a hodnocení obsahu přírodních radionuklidů ve stavebních materiálech a odpadech. [25]

Měření hmotnostních aktivit bylo provedeno metodou scintilační spektroskopie gama, viz kapitola 7.4.1.1.

Hmotnostní aktivity byly určeny ověřeným a kalibrovaným

scintilačním detekčním systémem EMS – 1 SH dle Zákona o metrologii, viz kapitola 7.4.

Měřený vzorek má tloušťku  $t = 30 \text{ [cm]}$ , objemovou hmotnost (hustotu)  $\rho = 2500 \text{ [kg/m}^3\text{]}$  a měřením bylo zjištěno, že hmotnostní aktivity radionuklidů jsou:

Přírodní radionuklid	Naměřená hmotnostní aktivita $a \text{ [Bq/kg]}$
$^{226}\text{Ra}$	55
$^{228}\text{Th}$	38
$^{40}\text{K}$	460

Tabulka 8-1: Naměřené hmotnostní aktivity [Vlastní zpracování]



Obrázek 8-1: Tvárnice z geopolymerního betonu [26]



### 8.3 Výpočet základních parametrů

#### 8.3.1 Výpočet dle scintilační spektroskopie gama

Tento výpočet se provádí z různých parametrů, jako jsou hmotnost vzorku, počtu impulzů, kalibračních koeficientů, času měření a dalších potřebných kritérií závislých na konkrétní laboratoři a konkrétním měření. Jelikož mám k dispozici pouze výsledky tohoto měření (Tabulka 8-1) ne průběžná data a parametry, které jsou k tomuto výpočtu potřeba, budu tento výpočet, viz kapitola 7.4.1.1, považovat za dokončený. Přejdu tedy rovnou ke zpracování těchto výsledků, viz kapitola 7.4.2.

#### 8.3.2 Zpracování výsledků

Nejprve si ověřím, zdali je splněna podmínka, že hmotnostní aktivita radionuklidu je menší než nejmenší detekovatelná hmotnostní aktivita radionuklidu ( $a < a_{ND}$ ) z Tabulky 7-5.

$$a_K > a_{ND,K} \Rightarrow 460 > 150 \quad \text{NENÍ SPLNĚNA}$$

$$a_{Ra} > a_{ND,Ra} \Rightarrow 55 > 15 \quad \text{NENÍ SPLNĚNA}$$

$$a_{Th} > a_{ND,Th} \Rightarrow 38 > 10 \quad \text{NENÍ SPLNĚNA}$$

Podmínka není splněna. Provedu tedy následující výpočet.

##### 8.3.2.1 Relativní kombinovaná standardní nejistota

Určí se z dílčích standardních nejistot  $u_{ri}$ . Ty určím z níže uvedené Tabulky 8-2.

Pro výpočet volím střední hodnoty.

Zdroj nejistoty	Obvyklá nejistota $u_{ri}$ [%]
Aktivita kalibračních vzorků	1 až 2
Kalibrace spektrometru	2 až 5
Příprava vzorků pro měření	2 až 5
Stanovení hmotnosti vzorku	0,2 až 2
Měření vzorku a pozadí	2 až 30
Samoabsorpce vzorku	1 až 10

Tabulka 8-2: Podklady pro odhad relativní standardní nejistoty - scintilační spektrometrie [17]

$$u_r = \sqrt{\sum_i u_{ri}^2} = \sqrt{1,5 + 3,5 + 3,5 + 1,1 + 16 + 5,5} = \sqrt{31,1} \doteq 5,58$$

$$\underline{\underline{u_r = 5,58 [\%]}} \quad (7.12)$$

**8.3.2.2 Kombinovaná standardní nejistota**

$$u_K = \frac{u_r \cdot a_K}{100} = \frac{5,58 \cdot 392}{100} \doteq 25,67$$

$$\underline{\underline{u_K = 25,67 [Bq / kg]}} \quad (7.13)$$

$$u_{Ra} = \frac{u_r \cdot a_{Ra}}{100} = \frac{5,58 \cdot 20}{100} \doteq 3,07$$

$$\underline{\underline{u_{Ra} = 3,07 [Bq / kg]}} \quad (7.13)$$

$$u_{Th} = \frac{u_r \cdot a_{Th}}{100} = \frac{5,58 \cdot 17}{100} \doteq 2,12$$

$$\underline{\underline{u_{Th} = 2,12 [Bq / kg]}} \quad (7.13)$$

**8.3.2.3 Relativní rozšířená nejistota**

$$U_r = 2 \cdot u_r = 2 \cdot 5,58 = 11,16$$

$$\underline{\underline{U_r = 11,16 [\%]}} \quad (7.14)$$

**8.3.2.4 Rozšířená nejistota**

$$U_K = 2 \cdot u_K = 2 \cdot 25,67 = 51,34$$

$$\underline{\underline{U_K = 51,34 [Bq / kg]}} \quad (7.15)$$

$$U_{Ra} = 2 \cdot u_{Ra} = 2 \cdot 3,07 = 6,14$$

$$\underline{\underline{U_{Ra} = 6,14 [Bq / kg]}} \quad (7.15)$$

$$U_{Th} = 2 \cdot u_{Th} = 2 \cdot 2,12 = 4,24$$

$$\underline{\underline{U_{Th} = 4,24 [Bq / kg]}} \quad (7.15)$$

Níže uvedená Tabulka 8-3 je upřesnění Tabulky 8-1. Hmotnostní aktivity jednotlivých radionuklidů jsou zde upřesněny o chybu měření.

Přírodní radionuklid	Naměřená hmotnostní aktivita $a [Bq / kg]$
$^{226}\text{Ra}$	$55 \pm 6,14$
$^{228}\text{Th}$	$38 \pm 4,24$
$^{40}\text{K}$	$460 \pm 51,34$

*Tabulka 8-3: Naměřené hmotnostní aktivity upřesněné o chybu měření [Vlastní zpracování]*

### 8.3.3 Výpočet indexu

#### 8.3.3.1 Index hmotnostní aktivity

$$I = \frac{a_K}{3000} + \frac{a_{Ra}}{300} + \frac{a_{Th}}{200} = \frac{460}{3000} + \frac{55}{300} + \frac{38}{200} \doteq 0,53$$

$$\underline{\underline{I = 0,53 [1]}} \quad (7.16)$$

#### 8.3.3.2 Nejmenší detekovatelná hodnota indexu hmotnostní aktivity

Nejmenší detekovatelná hmotnostní aktivita radionuklidu  $a_{ND}$  vychází z Tabulky 7-5.

$$I_{ND} = \frac{a_{ND,K}}{3000} + \frac{a_{ND,Ra}}{300} + \frac{a_{ND,Th}}{200} = \frac{150}{3000} + \frac{20}{300} + \frac{15}{200} \doteq 0,19$$

$$\underline{\underline{I_{ND} = 0,19 [1]}} \quad (7.17)$$

Tentokrát porovnávám hodnotu indexu hmotnostní aktivity a nejmenší detekovatelnou hodnotu indexu hmotnostní aktivity ( $I < I_{ND}$ ). Nebude-li splněna, počítám dále.

$$I > I_{ND} \Rightarrow 0,53 > 0,19 \quad \text{NENÍ SPLNĚNA}$$

#### 8.3.3.3 Standardní nejistota indexu hmotnostní aktivity

$$u_I = \sqrt{\left(\frac{u_K}{3000}\right)^2 + \left(\frac{u_{Ra}}{300}\right)^2 + \left(\frac{u_{Th}}{200}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{25,67}{3000}\right)^2 + \left(\frac{3,07}{300}\right)^2 + \left(\frac{2,12}{200}\right)^2} \doteq 0,017$$

$$\underline{\underline{u_I = 0,017 [1]}} \quad (7.18)$$

#### 8.3.3.4 Relativní standardní nejistota indexu hmotnostní aktivity

$$u_{Ir} = 100 \cdot \frac{u_I}{I} = 100 \cdot \frac{0,017}{0,53} \doteq 3,24$$

$$\underline{\underline{u_{Ir} = 3,24 [\%]}} \quad (7.19)$$

#### 8.3.3.5 Rozšířená relativní nejistota indexu hmotnostní aktivity

$$U_{Ir} = 2 \cdot u_{Ir} = 2 \cdot 3,24 \doteq 6,48$$

$$\underline{\underline{U_{Ir} = 6,48 [\%]}} \quad (7.20)$$

#### 8.3.3.6 Rozšířená nejistota indexu hmotnostní aktivity

$$U_I = 2 \cdot u_I = 2 \cdot 0,017 \doteq 0,03$$

$$\underline{\underline{U_I = 0,03 [\%]}} \quad (7.21)$$

## Modelový příklad

Níže uvedená tabulka je další upřesnění Tabulky 8-1. Hmotnostní aktivity jednotlivých radionuklidů jsou zde upřesněny o chybu měření, index hmotnostní aktivity a rozšířenou nejistotu indexu hmotnostní aktivity.

Přírodní radionuklid	Naměřená hmotnostní aktivita $a [Bq / kg]$	Index hmotnostní aktivity $I [1]$
$^{226}\text{Ra}$	$55 \pm 6,14$	$I = 0,53 \pm 0,03$
$^{228}\text{Th}$	$38 \pm 4,24$	
$^{40}\text{K}$	$460 \pm 51,34$	

*Tabulka 8-4: Naměřené hmotnostní aktivity v betonu upřesněné o chybu měření a index hmotnostní aktivity a rozšířenou nejistotu indexu hmotnostní aktivity [Vlastní zpracování]*

Měřením resp. výpočty jsem zjistil, že index hmotnostní aktivity převyšuje směrnou hodnotu z Tabulky 7-2. Zároveň hmotnostní aktivita radionuklidu  $^{226}\text{Ra}$  nepřevyšuje mezní hodnotu z Tabulky 7-1. V tomto případě splňuji podmínky pro výpočet dávky zevního ozáření.

### 8.4 Výpočet dávky zevního ozáření

Koeficienty pro jednotlivé radionuklidy a pozadí  $F_K, F_{Ra}, F_{Th}$  a  $F_P$ , jsem určil ze zadaných hodnot z Tabulky 8-1 a z Přílohy G.

$$E = a_K \cdot F_K + a_{Ra} \cdot F_{Ra} + a_{Th} \cdot F_{Th} - F_P = 460 \cdot 0,39 + 55 \cdot 4,28 + 38 \cdot 5,56 - 242 \div 348,1$$

$$E = 348,1 [\mu\text{Sv} / \text{rok}] \quad (7.22)$$

Index hmotnostní aktivity převyšuje směrnou hodnotu z Tabulky 7-2. Současně hmotnostní aktivita radionuklidu  $^{226}\text{Ra}$  nepřevyšuje mezní hodnotu z Tabulky 7-1 a nyní jsem také zjistil, že zároveň efektivní dávka ze zevního ozáření převyšuje úroveň 300  $[\mu\text{Sv}/\text{rok}]$ . Je tedy potřeba přistoupit k rozboru a výpočtu optimalizačních postupů.

### 8.5 Optimalizační postupy

V současné chvíli nelze využít tento druh geopolymerního betonu na stavby s obytnými nebo pobytovými místnostmi. Nesplňuje podmínky ve znění „Atomového zákona“ a Vyhlášky SÚJB č. 307/2002 Sb. O radiační ochraně a z její novely Vyhlášky SÚJB č. 499/2005 Sb. Viz kapitola 7.2.

Splňuje však podmínky pro aplikaci optimalizačních postupů. Index hmotnostní aktivity převyšuje směrnou hodnotu z Tabulky 7-2. Současně hmotnostní aktivita radionuklidu  $^{226}\text{Ra}$  nepřevyšuje mezní hodnotu z Tabulky 7-1 a zároveň efektivní dávka ze zevního ozáření převyšuje úroveň 300  $[\mu\text{Sv}/\text{rok}]$ .

### 8.5.1 Složka zodpovědná za zvýšený obsah přírodních radionuklidů

Ze zadání plyne, že tento geopolymerní beton obsahuje 85 % elektrárenského popílku. Je pravděpodobné, že popílek je ona složka, která může za zvýšený obsah přírodních radionuklidů. Bylo tedy provedeno doplňující měření tohoto popílku.

Hodnocení přírodních radionuklidů v tomto elektrárenském odpadu jsem provedl totožnou metodou v MS Excel, jako ve výše uvedeném výpočtu pro samotný beton. Zjistil jsem:

Přírodní radionuklid	Naměřená hmotnostní aktivita $a [Bq / kg]$	Index hmotnostní aktivity $I [1]$
$^{226}\text{Ra}$	$72 \pm 4,02$	$I = 0,60 \pm 0,04$
$^{228}\text{Th}$	$40 \pm 2,23$	
$^{40}\text{K}$	$490 \pm 27,34$	

*Tabulka 8-5: Naměřené hmotnostní aktivity elektrárenského popela upřesněné o chybu měření a index hmotnostní aktivity a rozšířenou nejistotu indexu hmotnostní aktivity [Vlastní zpracování]*

### 8.5.2 Určení koeficientu emanace radonu

Koeficient emanace radonu jsem určil z Tabulky 7-7 pro složku zodpovědnou za zvýšený obsah přírodních radionuklidů v betonu. Z této tabulky tedy plyne, že koeficient emanace pro popílek je  $k_{Rn} = 2 [\%]$ .

### 8.5.3 Uvažovaná opatření

Nejvýhodnějším opatřením především po ekonomické stránce bude využít pro výrobu geopolymerního betonu elektrárenský popílek z jiného zdroje. Zde jsem opět provedl výpočet a hodnocení přírodních radionuklidů v MS Excel:

Přírodní radionuklid	Naměřená hmotnostní aktivita $a [Bq / kg]$	Index hmotnostní aktivity $I [1]$
$^{226}\text{Ra}$	$36 \pm 2,01$	$I = 0,39 \pm 0,03$
$^{228}\text{Th}$	$25 \pm 1,40$	
$^{40}\text{K}$	$432 \pm 24,11$	

*Tabulka 8-6: Naměřené hmotnostní aktivity elektrárenského popela z jiného zdroje, upřesněné o chybu měření a index hmotnostní aktivity a rozšířenou nejistotu indexu hmotnostní aktivity [Vlastní zpracování]*

### 8.5.4 Obsah přírodních radionuklidů v betonu po provedení opatření

Obsah přírodních radionuklidů v betonu po provedení opatření se určí z hmotnostních aktivit jednotlivých radionuklidů  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Th}$   $a_K$ ,  $a_{Ra}$ ,  $a_{Th}$  před a po provedení opatření a z obsahu složky zodpovědné za zvýšený obsah přírodních radionuklidů v betonu. To je v tomto případě 85 % popela. [17]

$$a_{K,O} = 460 + 0,85 \cdot (432 - 490) \doteq 411$$

$$\underline{\underline{a_{K,O} = 411 [Bq / kg]}} \quad (8.1)$$

$$a_{Th,O} = 38 + 0,85 \cdot (25 - 40) \doteq 25$$

$$\underline{\underline{a_{Th,O} = 25 [Bq / kg]}} \quad (8.1)$$

$$a_{Ra,O} = 55 + 0,85 \cdot (36 - 72) \doteq 24$$

$$\underline{\underline{a_{Ra,O} = 24 [Bq / kg]}} \quad (8.1)$$

Přírodní radionuklid	Naměřená hmotnostní aktivita $a [Bq / kg]$	Index hmotnostní aktivity $I [1]$
$^{226}\text{Ra}$	$24 \pm 1,34$	$I = 0,34 \pm 0,02$
$^{228}\text{Th}$	$25 \pm 1,40$	
$^{40}\text{K}$	$411 \pm 22,93$	

*Tabulka 8-7: Naměřené hmotnostní aktivity v betonu po provedení opatření, upřesněné o chybu měření a index hmotnostní aktivity a rozšířenou nejistotu indexu hmotnostní aktivity [Vlastní zpracování]*

### 8.5.5 Odhad přínosu uvažovaného opatření

Očekávané změny hmotnostních aktivit radionuklidů  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Th}$   $\Delta a_K$ ,  $\Delta a_{Ra}$ ,  $\Delta a_{Th}$ , určím jako rozdíl hmotnostních aktivit radionuklidů před a po provedení opatření. Hodnoty přínosů opatření ze snížení hmotnostní aktivity  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Th}$   $f_K$ ,  $f_{Ra}$ ,  $f_{Th}$ , a přínosem opatření ze snížení emise radonu  $f_{Rn}$  jsem určil z Přílohy H.

$$P = f_K \cdot \Delta a_K + f_{Th} \cdot \Delta a_{Th} + (f_{Ra} + f_{Rn} \cdot k_{Rn}) \cdot \Delta a_{Ra} =$$

$$= 0,371 \cdot (460 - 411) + 5,31 \cdot (38 - 25) + (4,10 + (2,01 \cdot 2)) \cdot (55 - 24) =$$

$$= 18,179 + 69,03 + 251,72 \doteq 339$$

$$\underline{\underline{P = 339 [Kč / m^3]}} \quad (7.23)$$

Očekávaný přínos z realizace tohoto opatření je 339 Kč na 1 m<sup>3</sup> vyrobeného betonu.

## 8.6 Hodnocení výsledků měření

1. Hmotnostní aktivita radionuklidu  $^{226}\text{Ra}$  **n e p ř e k r a č u j e mezní hodnotu** stanovenou pro tento materiál Vyhláškou SÚJB č. 307/2002 Sb. Ve znění Vyhlášky SÚJB č. 499/2005 Sb., viz Tabulka 7-1.
2. Index hmotnostní aktivity „I“ **n e p ř e k r a č u j e směrnou hodnotu**. Přípustný rozsah použití vzhledem k směrným hodnotám je stanoven Vyhláškou SÚJB č. 307/2002 Sb. Ve znění Vyhlášky SÚJB č. 499/2005 Sb., viz Tabulka 7-2.

Vzhledem k výše uvedeným výsledkům měření (Tabulka 8-7) mohu konstatovat, že použití popílku z jiného zdroje, má za následek možnost využití zadaného geopolymerního betonu na stavby s obytnými nebo pobytovými místnostmi.

## 9. Závěr

Závěrem bych chtěl poznamenat, že se snižující se zásobou fosilních paliv roste poptávka po jiných zdrojích zejména čisté energie. Tou jaderná energie určitě je. Musí být však dodrženo velké množství bezpečnostních opatření. Jedním z těchto opatření je také požadavek na efektivní a hlavně bezpečné zpracování radioaktivních odpadů.

V této práci jsem stručně popsal co to radioaktivní odpad je, jak jej rozdělujeme a kde vzniká. Podrobněji jsem se věnoval především souhrnu informací o technologiích bezpečného přepracování a úprav i malého množství, pevných a kapalných radioaktivních odpadů. Provozovatelé jaderných elektráren i jiných zařízení pracujících s radioaktivním materiálem musí splňovat přísné podmínky ochrany zdraví a životního prostředí.

Dalším důležitým tématem popsaným v samostatné kapitole bylo ukládání radioaktivního odpadu. Budování úložišť a převážení odpadu do těchto úložišť stále budí ve společnosti velké kontroverze a protesty protijaderných aktivistů. Domnívám se, že je nutné důkladněji seznámit veřejnost s metodami ukládání radioaktivního odpadu a především s tím, jak jsou přísné podmínky pro tento způsob likvidace. Se zvyšujícími se nároky na ukládání z pohledu životního prostředí a celkové bezpečnosti, je kladen velký důraz na výzkum a vývoj a v neposlední řadě i na neustálé vylepšování stávajících technologií pro zpracování nebezpečných radioaktivních odpadů.

V poslední kapitole teoretické části jsem se věnoval zpracování a především ukládání radioaktivních odpadů v ČR. Protože náš stát provozuje dvě jaderné elektrárny, je nutné se touto problematikou zabývat o to více.

V praktické části jsem zpracovával měření a hodnocení obsahu přírodních radionuklidů ve stavebních materiálech a odpadech. Mým prvotním zdrojem byly mimo jiné i informace, které jsem získal v SÚJB v Ostravě.

Nejprve jsem prostudoval legislativu „Atomový zákon“ a vyhlášky SÚJB. Vymezil jsem metodiku měření, odběr a úpravu vzorků. Popsal jsem především dvě základní metody měření a výpočtu. Následně jsem se věnoval vyhodnocení vzorků, výpočtům nejistot měření a také určení indexu hmotnostní aktivity. Nakonec jsem definoval postupy při překročení mezní a směrné hodnoty, dávku zevního ozáření a optimalizační opatření.

Tyto závěry jsem aplikoval na návrh modelového příkladu, který jsem koncipoval tak, abych na něm ukázal co nejširší spektrum výpočtů již změřeného vzorku.

Vyhodnotil jsem, že je vhodné změnit zdroj elektrárenského popílku nejen kvůli dodržení předepsaných norem, ale i z hlediska ušetření nákladů na snížení hmotnostní aktivity popílku z původního zdroje.



## Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Prof. Ing. Pavlu Kolatovi, DrSc. za metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc, a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat své rodině za trpělivost, přítelkyni a kamarádům za podporu v průběhu studia.

V Ostravě 21. 5. 2012



.....

podpis studenta

## 10. Seznam použité literatury

- [1] Tittlová E., KANDIDÁTSKÁ DIZERTAČNÁ PRÁCA, Konceptia technologického spracovania pevných radioaktívnych odpadov z jadrovoenergetických zariadení, 1993
- [2] WIKIPEDIE - *Odpad* [online], [cit. 2012-18-2]. Dostupné z:  
< <http://cs.wikipedia.org/wiki/Odpad> >
- [3] ENCYKLOPEDIA FYZIKY – *Radioaktivní odpad* [online], [cit. 2012-18-2]. Dostupné z:  
< <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/842-radioaktivni-odpad> >
- [4] ENCYKLOPEDIA ENERGIE – *Institucionální radioaktivní odpady* [online], [cit. 2012-18-2] Dostupné z:  
< [http://www.energyweb.cz/web/index.php?display\\_page=2&subitem=1&ee\\_chapter=3.3.3](http://www.energyweb.cz/web/index.php?display_page=2&subitem=1&ee_chapter=3.3.3) >
- [5] VUT BRNO – *Nové trendy v ukládání RAO* [online], [cit. 2012-19-2]. Dostupné z:  
< [http://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=29793](http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=29793) >
- [6] ČVUT - *Ukládání odpadů v ČR* [online], [cit. 2012-19-2]. Dostupné z:  
< [http://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=29793](http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=29793) >
- [7] IHNED – *Institucionální radioaktivní odpady* [online], [cit. 2012-19-2]. Dostupné z:  
< <http://odpady.ihned.cz/c1-20893840-institucionalni-radioaktivni-odpady> >
- [8] JAVYS, A.S. – *Nakládání s RAO* [online], [cit. 2012-20-2]. Dostupné z:  
< <http://www.javys.sk/sk/index.php?page=nakladanie-s-rao/rozdelenie-rao> >
- [9] KEPÁK F. – *Energetika a životní prostředí* [online], [cit. 2012-1-3]. Dostupné z:  
< [http://fzp.ujep.cz/ktv/uc\\_texty/enzp/ENZPskripta.pdf](http://fzp.ujep.cz/ktv/uc_texty/enzp/ENZPskripta.pdf) >
- [10] AMEC, A.S. – *Fixační matrice SIAL* [online], [cit. 2012-1-3]. Dostupné z:  
< <http://www.amec-nuclear.cz/sluzby/sial.htm> >
- [11] JADERNÝ ODPAD. – *Sklady PJP* [online], [cit. 2012-1-3]. Dostupné z:  
< <http://www.jaderny-odpad.cz/mezisklady-vyhoreleho-paliva.htm> >
- [12] ČEZ, A.S. – *RAO a skupina ČEZ* [online], [cit. 2012-5-3]. Dostupné z:  
< [http://www.cez.cz/edee/content/micrositesutf/odpovednost/content/pdf/cez\\_a\\_radioaktivni\\_odpady\\_-\\_nahled.pdf](http://www.cez.cz/edee/content/micrositesutf/odpovednost/content/pdf/cez_a_radioaktivni_odpady_-_nahled.pdf) >
- [13] SÚRAO. – *Úložiště RAO* [online], [cit. 2012-5-3]. Dostupné z:  
< <http://www.surao.cz/cze/Uloziste-radioaktivnich-odpadu> >

- [14] ČEZ, A.S. – *Nový sklad paliva v Temelíně* [online], [cit. 2012-9-3]. Dostupné z:  
< <http://www.cez.cz/cs/pro-media/multimedia/94.html?videoid=94&filter2=jel> >
- [15] SÚJB. – *ZÁKON č. 18/1997 Sb „Atomový zákon“* [online], [cit. 2012-9-3]. Dostupné z:  
< [http://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/legislativa/zakony/Atomovy\\_zakon\\_20120103.pdf](http://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/legislativa/zakony/Atomovy_zakon_20120103.pdf) >
- [16] SÚJB. – *Vyhláška SÚJB o radiační ochraně* [online], [cit. 2012-10-3]. Dostupné z:  
< [http://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/legislativa/vyhlasiky/v307\\_02.pdf](http://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/legislativa/vyhlasiky/v307_02.pdf) >
- [17] SÚJB. – *Měření a hodnocení obsahu přírodních radionuklidů ve stavebních materiálech* [online], [cit. 2012-10-3]. Dostupné z: < [http://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/radiacni-ochrana/stavebni\\_materialy.pdf](http://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/radiacni-ochrana/stavebni_materialy.pdf) >
- [18] RADIOAKTIVITA. – *Měření ionizujícího záření* [online], [cit. 2012-15-3]. Dostupné z:  
< [http://www.radioaktivita.cz/mereni\\_mat.html](http://www.radioaktivita.cz/mereni_mat.html) >
- [19] VUT, BRNO – *Rozvoj metod v radiační defektoskopii* [online], [cit. 2012-15-3].  
Dostupné z:  
< [http://www.fce.vutbr.cz/veda/juniorstav2008\\_sekce/pdf/2\\_5/Lunacek\\_Martin\\_CL.pdf](http://www.fce.vutbr.cz/veda/juniorstav2008_sekce/pdf/2_5/Lunacek_Martin_CL.pdf) >
- [20] ASTRONU KL FYZIKA. – *Detekce a spektrometrie ionizujícího záření* [online], [cit. 2012-17-3]. Dostupné z: < <http://astronuklfyzika.cz/DetekceSpektrometrie.htm#5> >
- [21] WIKIPEDIE. – *Nejistoty měření* [online], [cit. 2012-18-3]. Dostupné z:  
< [http://cs.wikipedia.org/wiki/Nejistoty\\_měření](http://cs.wikipedia.org/wiki/Nejistoty_měření) >
- [22] PHYSICS. – *Measurement of Radiation* [online], [cit. 2012-22-3]. Dostupné z:  
< <http://www.physics.isu.edu/radinf/naidetector.htm> >
- [23] DIRECT SCIENTIFIC. – *Detector and stands* [online], [cit. 2012-29-3]. Dostupné z:  
< [http://www.drct.com/Spectrum\\_Techniques/detectors\\_stands.html](http://www.drct.com/Spectrum_Techniques/detectors_stands.html) >
- [24] RENSSLAER. – *Radiation detectors* [online], [cit. 2012-29-3]. Dostupné z:  
< [http://www.rpi.edu/dept/radsafe/public\\_html/instruments.htm](http://www.rpi.edu/dept/radsafe/public_html/instruments.htm) >
- [25] WIKIPEDIA. – *Sievert* [online], [cit. 2012-22-3]. Dostupné z:  
< <http://en.wikipedia.org/wiki/Sievert> >
- [26] CZSK. – *Popílek přestane hyzdit krajinu* [online], [cit. 2012-2-4]. Dostupné z:  
< <http://www.czsk.net/svet/clanky/cr/beton.html> >

- [27] ACADEMIC JOURNALS. – *Effect of types of curing on strength of geopolymer concrete* [online], [cit. 2012-2-4]. Dostupné z:  
< <http://www.academicjournals.org/ijps/pdf/pdf2010/18%20Aug/Vijai%20et%20al.pdf> >
- [28] POSTAPO. – *Zajištění bezpečí* [online], [cit. 2012-23-4]. Dostupné z:  
< <http://postapo.cz/nutne-k-preziti/zajisteni-bezpeci/jaderna-katastrofa/> >
- [29] IEM. – *Half lives* [online], [cit. 2012-23-4]. Dostupné z:  
< <http://www.iem-inc.com/toolhalf.html> >

## 11. Seznam příloh

- Příloha A – Centrum na přepracování RAO v BSC [8]
- Příloha B – Množství zpracovaných a upravených institucionálních RAO [7]
- Příloha C – Pronikavost radioaktivních částic [28]
- Příloha D – Rozhodovací schéma měření a hodnocení obsahu přírodních radionuklidů [17]
- Příloha E – Příklad protokolu o odběru vzorku odpadu [18]
- Příloha F – Poločasy rozpadů měřených radionuklidů a křivky poločasů rozpadů [20]
- Příloha G – Odhad efektivní dávky ozáření [17]
- Příloha H – Odhad přínosu opatření [17]